

[illegible]

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

До захисту допущено
Завідувач кафедри

_____ Ю.С. Ямненко
(підпис) (ініціали, прізвище)

„_____” _____ 2019р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки _____ 6.050802 Електронні пристрої та системи
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему: **«Зарядний пристрій імпульсним струмом»**

Виконав: студент 4-го курсу, групи ДС-51

Чемерега Євген Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник доцент кафедри ПЕ, к.т.н., Волківський В.Б.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультанти: Технічний розділ
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент проф. каф. ЕП та Пр, д.т.н., доцент Кузмичєв А.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки

(повна назва)

Кафедра промислової електроніки

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050802 Електронні пристрої та системи

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко
(підпис) (прізвище ініціали)

« » 2019 року

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

Чемерезі Євгену Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту :Зарядний пристрій імпульсним струмом

Керівник проекту: Волківський Вадим Борисович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «23» березня 2019 року № 1008-с

2. Строк подання студентом проекту: за тиждень до захисту

3. Вихідні дані до проекту Розробити малогабаритний пристрій імпульсним струмом з параметрами: $U_{дж} = 220В$, $I_{зар} = 5А$

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) Вступ. Види акумуляторів та способи їх заряду. Вибір перетворювача. Складання принципової схеми. Моделювання складеної схеми у середовищі MATLAB

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Теоретичні креслення

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний			

7. Дата видачі завдання 20.05.19

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строки виконання етапів проекту	Примітка
1	Консультація з керівником практики	20.05.19 – 21.05.19	
2	Огляд літератури	22.05.19 - 26.05.19	
3	Підбір перетворювача напруги	27.05.19 – 28.05.19	
4	Обчислення параметрів елементів	29.05.19 – 30.05.19	
5	Розробка системи керування	31.05.19 – 02.06.19	
6	Огляд системи моделювання MATLAB	03.06.19 – 04.06.19	
7	Моделювання схеми в середовищі MATLAB	05.06.19 – 07.06.19	
8	Аналіз результатів	08.06.19 – 09.06.19	
9	Підготовка пояснювальної записки та графічного матеріалу	10.06.19 – 16.06.19	

Студент

(підпис)

Чемерега Є.Ю.
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Волківський В.Б.
(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Метою дослідження є створення малогабаритного приладу заряджання акумуляторних батарей імпульсним струмом. Дослідження перетворювачів напруги, які б забезпечили необхідні параметри заряду, і при тому мали великий ККД і надійність для роботи з різними акумуляторами, Розробка зарядного пристрою та розробка алгоритму ефективного управління ним.

Дані завдання виконувались методом збору інформації з різних джерел і об'єднанням їх в цілісну систему яка дає чітке розуміння про види акумуляторів а також типи їх заряду і розряду, параметри і характеристики. Також було розглянуто перетворювачі струму, і на основі вибраного створено модель у середовищі MATLAB – Simulink, де і відбувалося дослідження роботи приладу, системи керування та аналіз отриманих результатів.

ANNOTATION

The purpose of the study is to create a small battery charging device with pulsed current. Research of voltage converters that would provide the necessary parameters of the charge, and at the same time had a high efficiency and reliability for working with different batteries, Development of charger and development of an algorithm for efficient management.

These tasks were performed by the method of collecting information from different sources and combining them into a coherent system which gives a clear understanding of types of batteries as well as their types of charge and discharge, parameters and characteristics. Also, current converters were considered, and based on the selected model created in the MATLAB - Simulink environment, where the study of the operation of the device, control system and analysis of the results was carried out.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ВИДИ АКУМУЛЯТОРІВ ТА СПОСОБИ ЇХ ЗАРЯДУ.....	6
1.1 Типи акумуляторів	6
1.1.1. Загальні положення	6
1.2. Способи заряду акумуляторів.....	10
2. СТРУКТУРНА СХЕМА	15
2.1. Ізольовані двох-направленні перетворювачі постійної напруги	15
2.2. Прямий імпульсний перетворювач	16
2.3. Розробка структурної схеми	19
3. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА	23
3.1. Опис принципової схеми	23
3.2. Елементи і розрахунок їх параметрів.....	25
3.2.1. Розрахунок параметрів трансформатора	25
3.2.2. Мікросхема UC3842	28
4. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ	31
4.1. Принцип роботи та опис схеми	31
4.1.1. Опис моделі пристрою	31
4.1.2. Підсистема системи керування.....	32
4.1.3. Підсистема моделі акумулятора	34
4.2. Параметри блоків силової частини	38

					ДС51.511.803.001.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	Зарядний пристрій імпульсним струмом Пояснювальна записка		
Розроб.		Чемерега Є.Ю.					
Перевір.		Волківський					
Н. Контр.		Батрак Л.М.					
Затверд.		Волківський					
					Літ.	Аркуш	Аркушів
						3	51
					НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ каф. ПЕ		

4.3. Результати моделювання	46
ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	50

ВСТУП

Проблема переносних джерел енергії являється актуальною вже кілька століть, і лише в другій половині 20-го століття люди зробили впевнені кроки у вирішенні даної проблеми. Були винайдені нові типи акумуляторів, такі як нікель-кадмієві чи літій-іонні акумулятори. Дані технології набули широкого розповсюдження у цілому світі і не перестають розвиватися ведучими вченими у провідних країнах США, Японії, Франції.

В цій галузі основними параметрами для розвитку являються: ціна, тривалість використання, ККД і розміри акумуляторів і зарядних пристроїв.

Буде розглянуто наступні питання:

- аналіз характеристик акумуляторних батарей та способів їх заряду та розряду;
- розробка схеми малогабаритного пристрою для заряду акумуляторних батарей;
- моделювання схеми пристрою та наступний аналіз за допомогою середовища MATLAB.

Прилад, який розробляється в даній роботі, направлений саме на зменшення габаритів зарядного пристрою і збільшення ККД, що в свою чергу приведе до полегшення транспортування, а також до зменшення енергетичних затрат. Серед матеріалів будуть використовуватись високо ефективні ключі виконані на польових транзисторах, малогабаритні трансформатори, а також системи керування які зменшать споживання електроенергії за рахунок включення і виключення певних елементів від джерел живлення.

Моделювання в середовищі MATLAB покаже наближенні до реальних значень характеристики даного приладу, і більш наглядно зобразить переваги і особливості останнього.

1. ВИДИ АКУМУЛЯТОРІВ ТА СПОСОБИ ЇХ ЗАРЯДУ

1.1 Типи акумуляторів

1.1.1. Загальні положення

Акумуляторами називають хімічні джерела електроенергії багаторазового використання. Основні складові – два електроди (позитивний і негативний), електроліт, в якому ці електроди знаходяться, а також корпус. Акумулятор накопичує енергію під час протікання в ньому хімічної реакції окислення-відновлення – на позитивному електроді відбувається реакція окислювання, а на негативному – реакція відновлення. При розряді акумулятора відбуваються зворотні процеси. Напруга акумулятора – це різниця потенціалів між полюсами акумулятора при фіксованому навантаженні.

Для одержання досить великих значень напруги або ємності окремі акумулятори з'єднуються між собою послідовно або паралельно в батареї, які і називаються – акумуляторні батареї.

При паралельному з'єднанні акумуляторів, тобто при з'єднанні між собою позитивних і негативних полюсів всіх елементів відповідно, можна скласти батарею великої ємності з напругою, рівною номінальній напрузі одного акумулятора і ємністю, рівній сумі ємностей складових її акумуляторів.

Номінальною ємністю акумулятора називається ємність, гарантовану заводом виготовлювачем за певних умов розряду. Зарядною ємністю називається кількість електрики, що віддається акумуляторові при заряді. Зарядна ємність завжди трохи більше розрядної через необоротні процеси, що протікають при заряді і розряді.

Основними параметрами акумуляторів є: максимальний термін експлуатації, ємність акумулятора, глибина розряду, кількість циклів перезарядки, параметри саморозряду, габаритні розміри, робочий

температурний діапазон, можливість прискореної зарядки, максимальний термін зберігання.

В акумуляторах, що знаходяться в експлуатації безупинно повторюється послідовність електрохімічних перетворень. Одну послідовність заряду/розряду акумулятора називають циклом. Під глибокими циклами розуміють цикли повного заряду/розряду акумулятора при нормальних умовах.

З кожним циклом акумулятори зношуються. Довговічність акумулятора оцінюють кількістю циклів. Цей параметр різний для різних типів акумуляторів. В одних акумуляторах при нормальних умовах експлуатації вона складає не більш ніж 10 циклів, в інших досягає 100 і 1000 циклів. Погіршення параметрів акумулятора і вихід з ладу обумовлені в першу чергу корозією ґратки і оповзанням активної маси позитивного електрода.

Довговічність акумуляторів залежить від:

- ресурсу закладеного в електрохімічну систему і конструкцію акумулятора;
- умов введення в експлуатацію;
- методів заряджання;
- глибини розряджання.

Явище саморозряду характерне і полягає у втраті акумуляторами своєї ємності після того, як вони були повністю заряджені, під час відсутності зовнішнього споживача струму і є характерним для всіх типів акумуляторів. Важливо сказати, що максимальний саморозряд акумуляторів спостерігається в перші 24 години після заряду, а потім значно зменшується. Глибокий розряд і наступний заряд збільшують струм саморозряду.

Саморозряд акумуляторів в основному зумовлений виділенням кисню на позитивних пластинах. При підвищенні температури, явище саморозряду стає сильнішим. Для прикладу, при підвищенні навколишньої температури на 10 градусів Цельсія по відношенню до кімнатної, можливе збільшення саморозряду в два рази.

В залежності від фізичних процесів які протікають на електродах акумулятора, виділяють два типи акумуляторів лужні і кислотні акумулятори. У лужних акумуляторах електролітом служить водний розчин їдкого лугу (їдкого калію або їдкого натрію з добавкою або без добавки їдкого літію), у кислотних – водний розчин сірчаної кислоти. По складу активної маси пластин акумулятори розділяються на:

- Свинцево-кислотний (Sealed Lead Acid - SLA) - найпоширеніший тип акумуляторної батареї, який використовується в автомобілях, або як джерело безперебійного живлення в аварійних випадках.
- Нікель-кадмієві (NiCd) - найбільшого поширення набули як заміна стандартного гальванічного елемента, так само застосовуються в електромобілях, трамваях і тролейбусах для здійснення живлення ланцюгів управління.
- Нікель-метал-гідридні (NiMH) - так само використовуються як заміна стандартного гальванічного елемента, в електромобілях, радіоапаратурі, освітлювальній техніці.
- Літій-іонні (Li-ion) - знайшов застосування в сучасних побутових і будівельних приладах, є дуже поширеними в сфері мобільних пристроїв.
- Літій-полімерні (Li-pol) - використовується в мобільних пристроях і цифровій техніці.

Стан і робота акумулятора дуже сильно залежить і від навколишніх умов, конкретно від температури, оскільки чим більше температура речовини в акумуляторі, то і більша енергія електрона, а значить за однакового об'єму, но при різних температурах питома енергія буде різною, і тому при виборі акумуляторів необхідно враховувати залежність питомої енергії від температури навколишнього середовища, наведеної в таблиці. 1.1, яка показує, що питома вага енергії срібно-цинкових батарей залежить значно більше від температури.

Таблиця 1.1.

Залежність питомої енергії від температури навколишнього середовища.

Акумулятор	Питома енергія, Вт*год/кг при температурі, С	Вплив на апаратуру і людей
------------	--	----------------------------

Продовження табл. 1.1.

	20	0	-20	-40	
Свинцево-кислотний	36	29	18	8	Найбільш шкідливі з усіх акумуляторів
Нікель-кадмієвий, ламельний	20	16	11	5	Менш шкідливі, ніж кислотні
Нікель-кадмієвий, безламельний	38	33	26	19	Менш шкідливі, ніж кислотні
Залізо-нікелевий	18	13	9	-	Менш шкідливі, ніж кислотні
Срібно-цинковий	90	75	35	6	Найменш шкідливі з усіх акумуляторів

Важливою особливістю акумуляторів є відносна вартість 1 Вт * год енергії від різних типів акумуляторів з приблизно однаковою ємністю і вартістю, відносно 1 Вт * год енергії для свинцево-кислотної батареї (табл. 1.2).

Як видно з табл. 1.2. дорожче всього обходиться енергія, одержувана від срібно-цинкових і кадмієвих акумуляторів, і дешевше від свинцево-кислотних, прийнятих у даному випадку за одиницю.

Таблиця 1.2

Відносна вартість 1Вт*год енергії, одержуваної від акумуляторів.

Акумулятор	Відносна вартість
Свинцево-кислотний	1
Нікель-кадмієвий, ламельний	3
Нікель-кадмієвий, безламельний	13
Залізо-нікелевий	2
Срібно-цинковий	15

В табл. 1.3. приведено узагальнену інформацію по типах акумуляторів і їх параметри.

Таблиця 1.3.

Параметри різних типів акумуляторів

Акумулятор Параметр	Свинцево-кислотний	Нікель-матал-гідридний	Нікель-кадмієвий	Літій-іонний	Літій-полімерний	Срібно-кадмієвий
Анод(+) Катод (-)	Pb PbO ₂	Fe NiO _x	Cd NiO _x	Zn NiO _x	Zn AgO	Cd AgO
Напруга холостого ходу, В	2,15	1,4	1,35	1,8	1,86	1,4
Напруга під навантаженням, В	1,75-1,9	1,1-1,3	1,1-1,3	1,5-1,7	1,3-1,5	1,1
Макс. ємність, Ампер*год/кг	55	195	165	185	285	230
Пит. енергія, Вт*год/кг	12-14	16	18	40	60	30
Накопичувана енергія Вт*год/дм ³ Цикл. терм. служби Термін збереження, р	25...30 1000 3	16,6 3000 5	30 1500 5	54 300 -	54 50 -	42 200 6
Хар-ки при низькій тем-рі (відняття ємності при 0 °C до ємн. при 25 °C)	60%	35%	65%	40%	35%	50%
Збереження заряду при 25 °C (до ємності 80%), місяць Збереження заряду при 45 °C (до ємності 80%), місяць	18 6	3 1	6 1	6 1	6 1	9 2

1.2. Способи заряду акумуляторів

Заряд акумулятора відбувається, якщо до нього прикладено напругу, що перевищує його власну. Процес заряду акумулятора характеризується швидкістю та струмом його заряду. Швидкість заряду акумулятора може бути визначена як відношення C / t , де C – ємність акумулятора, t – час за який заряджається акумулятор. Струм заряду акумулятора пропорційний різниці прикладеної напруги і напруги холостого ходу. Акумулятор ємністю 100 Ампер*год при розряді зі швидкістю $C / 5$ цілком розрядиться за 5 годин, при цьому струм розряду складе 20 А. Якщо акумулятор заряджається зі швидкістю $C/10$, то струм його заряду буде дорівнювати 10 А. Швидкість зряду можна оцінити в тривалості циклу. Так, якщо акумулятор заряджається за 5 годин, то він має цикл 5 годин.

При заряді акумуляторів застосовують наступні способи заряду:

- при постійному струмі ($I = \text{const}$);
- при постійній напрузі ($U = \text{const}$);
- комбінований спосіб – заряд при постійному струмі до досягнення на акумуляторі визначеної напруги, яка потім підтримується постійною доти, поки струм не знизиться до визначеного значення;
- переривчастим струмом;
- імпульсним асиметричним струмом.

У залежності від області застосування акумуляторів розрізняють ще деякі різновиди вищезгаданих способів заряду:

- швидкий заряд;
- циклічний заряд;
- плаваючий заряд – спосіб підтримки підзаряджаємої батареї при повному заряді шляхом подачі зворотної постійної напруги для компенсації в ній різних втрат;
- компенсаційний підзаряд – спосіб, при якому для приведення батареї в цілком заряджений стан і підтримки її в цьому стані використовується постійний струм заряду .

Швидкий заряд триває від 4 до 6 годин, у той час як тривалість розряду в штатному режимі варіюється від 10 до 15 годин. При циклічному заряді потрібна постійна напруга або постійний струм заряду. Іноді використовується плаваючий заряд, під час якого навантаження й акумулятор включаються паралельно, або компенсаційний підзаряд, коли потужність постійного струму подається в навантаження, у той час як ланцюг заряду акумулятора з навантаженням не з'єднаний.

На практиці найчастіше використовується швидкий заряд акумулятора (до 90% ємності) з наступним автоматичним переключенням на меншу швидкість заряду (до повної ємності).

Метод квазі-постійного струму характеризується тим, що на початку заряду напруга батареї має мінімальне значення, струм заряду максимальний і по мірі заряду батареї напруга зростає, а струм заряду зменшується. Величина обмежуючого опору R визначає максимальний струм заряду батареї на початку періоду на рівні $0,1C$ (де C – ємність акумулятора в Ампер*год, а $0,1$ – коефіцієнт у $ч^{-1}$).

Сенс дво-інтервального методу полягає у розбиванні часу заряду на два інтервали. Відмінність методів полягає в організації контролю закінчення першого інтервалу, у той час як на другому інтервалі у всіх методах здійснюється компенсація саморозряду батареї струмом $0,05C \div 0,033C$. У методі заряду за часом на першому, жорстко заданому інтервалі відбувається основний заряд батареї струмом $0,2C$ і тривалість інтервалів контролюється таймером, що входить до складу системи. У методі заряду з контролем спаду напруги на першому інтервалі заряд здійснюється постійним струмом $0,5C \div 1C$ і ознакою його закінчення є спад напруги батареї, що складає $15 \div 20$ мВ на один елемент і визначається за допомогою компаратора. У методі контролю градієнта температури батареї на першому інтервалі відбувається основний заряд струмом $0,5C \div 1C$, ознакою закінчення якого є зростання градієнта температури батареї в наслідок електролізу води, що супроводжується

виділенням тепла і контроль над яким здійснюється за допомогою датчика температури, що входить до складу системи.

Метод з безперервною підзарядкою батареї, або метод заряду батареї в буферному режимі характеризується безперервним зарядом невеликим струмом, що не здатний викликати ефект перезарядження і підтримує батарею в максимально зарядженому стані. Величина струму заряду вибирається виходячи з періодичності використання батареї – при частому використанні контролер, що веде статистику періодичності використання батареї, установлює струм заряду $0,033C \div 0,05C$, а при рідкому використанні $0,02C \div 0,033C$. При зникненні зовнішнього живлення заряджена батарея підключається до навантаження за допомогою реле, що включається системою керування. Даний метод також відноситься до дво-інтервальних, але, на відміну від попередніх, у ньому жорстко обмежується час розряду.

У методі імпульсного заряду батарея заряджається імпульсами струму з постійною амплітудою, рівної $2C$. Між імпульсами струму є короткі паузи (rest-періоди), протягом яких батарея знаходиться в стані спокою, і які дозволяють хімічним реакціям у батареї рівномірно розподілятися по всій поверхні електродів. Така форма струму частково запобігає ефектові пам'яті, що виявляється в зменшенні реальної ємності акумулятора в процесі експлуатації.

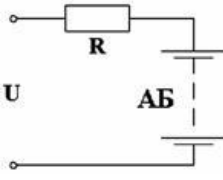
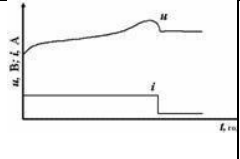
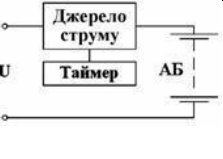
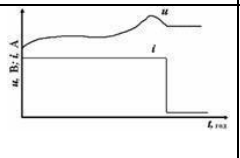

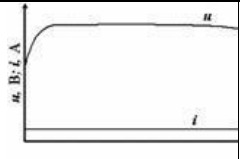

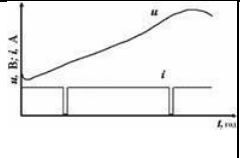
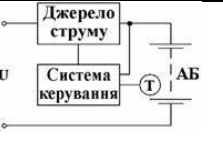
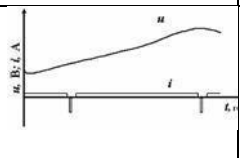

Існує також метод заряду імпульсним асиметричним струмом, або метод імпульсного заряду зі зворотним викидом який характеризують заряджанням батареї імпульсами струму з постійною амплітудою, рівної $2C$, між якими є короткі паузи, а також імпульси розрядного струму з амплітудою $10C$. Завдяки таким імпульсам розряджання кисень, що виділяється в процесі заряджання батареї, видаляють з реагуючої пластини, що запобігає її окислюванню й продовжує термін служби батареї. Для визначення закінчення заряджання батареї в останніх двох режимах може використатися ознака спаду напруги та (або) ознака градієнта температури.

В табл. 1.4. приведені узагальнені дані про види заряду акумуляторів.

					ДС51.511.803.001.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		13

Таблиця 1.4.

Характеристики методів заряджання акумуляторів

Метод		Криві заряджання	Еквівалентна схема	Переваги	Недоліки
Квазі-усталеного струму				Проста конструкція системи заряджання	тривалий час заряджання; більші втрати на обмежувальному резисторі R
Двоінтервальні методи	Заряджання за часом			Проста конструкція системи заряджання	не враховано ступінь початкового рівня розряду батареї
	Контроль спаду напруги			висока швидкість заряджання	можливі помилки під час визначення часу завершення заряджання, внаслідок чого можливе перезарядження акумулятора (виділення активної маси з елемента)
	З безперервним підзарядженням батареї			простота конструкції; низька вартість системи заряджання	відсутність контролю за процесом заряджання
Імпульсне заряджання батареї				зниження ефекту пам'яті батареї	складна конструкція системи заряджання
Заряджання асиметричним струмом				Зниження ефекту пам'яті батареї за умови заряджання	складна конструкція системи заряджання.

2. СТРУКТУРНА СХЕМА

2.1. Ізольовані двох-направленні перетворювачі постійної напруги

Ізольовані перетворювачі в основному використовуються в пристроях, де потрібна гальванічна розв'язка джерела від навантаження. Гальванічна розв'язка в бортовій системі електромобіля необхідна для забезпечення електробезпеки, так як акумуляторна батарея з напругою, що є джерелом енергії, становить небезпеку для людини. В ізольованому двонаправленому перетворювачі постійної напруги електрична розв'язка забезпечується високочастотним трансформатором (ВТ). Незважаючи на те що використання трансформатора призведе до збільшення втрат і погіршення масогабаритних показників перетворювача, трансформатор забезпечує електричну ізоляцію високовольтного джерела від низьковольтної навантаження. Даний тип перетворювача може бути застосований для електропостачання бортових споживачів напругою 12 В, а також для заряду буферного акумулятора ЕТС. При цьому немає необхідності в зворотному перетворенні енергії, що спрощує структуру і схему перетворювача. Оскільки маса і габарити трансформатора обернено пропорційні частоті, то використання напруги з високою частотою дозволяє зменшити масу і габарити перетворювача напруги. Використовуючи дану перевагу, розміри сучасних феритових трансформаторів зведені до мінімуму при робочих частотах від декількох сотень кілогерц до одиниць мегагерц. При великому підвищенні або зниженні напруги використання трансформатора може бути кращим технічним рішенням з точки зору оптимізації та підвищення ефективності перетворювача. При використанні трансформатора напруга і струми навантаження, накладені на транзистори і діоди, можуть бути мінімізовані, що призведе до зниження вартості перетворювача. Використання трансформатора дає можливість отримати кілька виходів постійної напруги, додавши кілька вторинних обмоток і конвертор вторинному ланцюзі. Кількість витків вторинної обмотки і

коефіцієнт трансформації вибирається таким чином, щоб отримати бажану вихідну напругу. Приклад використання трансформатора з двома вторинними обмотками показано на рис. 2.1.

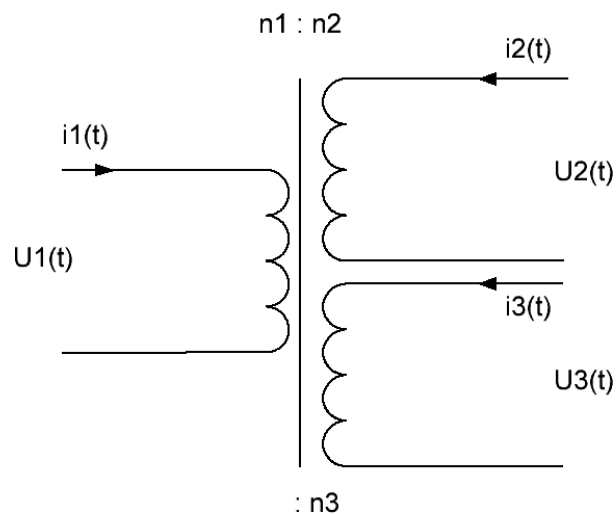


Рис. 2.1. Трансформатор з двома вторинними обмотками

Існує кілька топологій перетворювачів постійної напруги з ізольованим трансформатором:

- зворотні імпульсні перетворювачі (fly back converter);
- прямі імпульсні перетворювачі (forward converter);
- перетворювачі з двотактним виходом (push-pull);
- перетворювачі з напівмостовим виходом (half bridge converter);
- перетворювач з мостовим виходом (full bridge converter).

В таблиці 2.1. наведена оцінка складно перетворювачів постійної напруги.

Схема	Діапазон потужності, Вт	Відносна складність
Зворотно-ходова	1...100	Низька
Прямо-ходова	1...200	Середня
Двотактна	200...500	Середня
Напів-мостова	200...500	Висока
Мостова	500...2000	Дуже висока

2.2. Прямий імпульсний перетворювач

Прямі імпульсні перетворювачі (англ. Forward converter) в основному використовуються в автономних джерелах і в блоках живлення малопотужної електроніки потужністю нижче 200 Вт. Простота і мала кількість елементів роблять перетворювачі даної топології альтернативою зворотному перетворювачу.

Особливістю перетворювача даної топології є здатність витримувати великі струми на виході і ізоляція вхідної напруги від вихідного. На рис. 2.2. показана схема прямого перетворювача і тимчасові діаграми параметрів ППН.

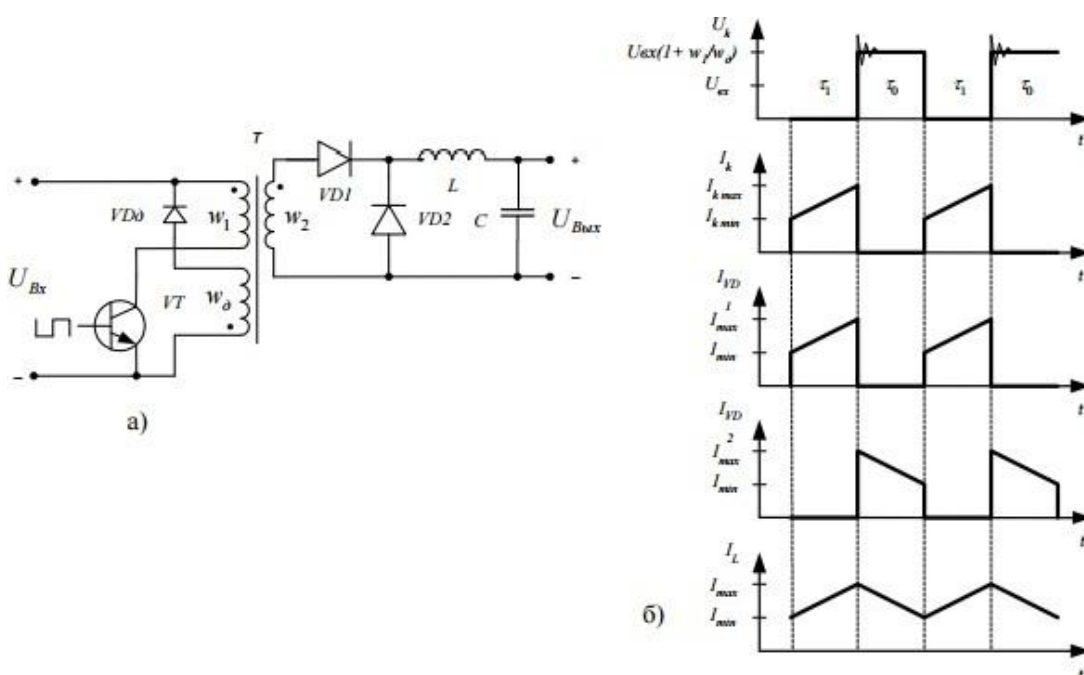


Рис. 2.2. Схема (а) і часові діаграми (б) прямого перетворювача

Принципова відмінність прямого перетворювача від зворотного полягає в тому, що первинне джерело підключається до навантаження через трансформатор T , і навантаження отримує енергію під час замкнутого стану ключа VT . Звідси і назва прямий перетворювач з прямим включенням діода.

Вихідна напруга перетворювача даної топології пов'язано з вхідною напругою наступним співвідношенням:

$$U_{вих} = U_{ex} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_0 + \tau_1} \cdot \frac{1}{k} = U_{ex} \cdot \gamma$$

де $k = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ - коефіцієнт трансформації трансформатора, ω_1, ω_2 -

число витків первинної і вторинної обмотки, τ_1, τ_0 - час роботи і паузи перетворювача відповідно.

Таким чином, за рахунок вибору коефіцієнта трансформації трансформатора k можна знайти оптимальне співвідношення амплітуди струму і напруги на ключовому пристрої.

На відміну від зворотного перетворювача, енергія, накопичена в магнітному полі сердечника трансформатора прямого перетворювача за час τ_1 , в навантаження не надходить. Дана накопичена енергія до початку наступного циклу повинна бути виведена з сердечника, в іншому випадку енергія, отримана в наступному циклі, підсумовується з попередньої, і сердечник увійде в режим насичення, що є неприпустимим. Для вирішення даної проблеми в прямому ППН використовується додаткова обмотка розмагнічення ω_d і діод VD_d . Цей діод відмикається, коли ключ VT закритий і забезпечує протікання струму намагнічування, тим самим повертає накопичену енергію сердечника в первинне джерело. Цей процес повинен відбутися за час паузи τ_0 , а для цього має виконуватися нерівність: $\frac{\tau_1}{\omega_1} < \frac{\tau_0}{\omega_d}$, де ω_d -

кількість витків додаткової обмотки. Однак це призведе до обмеження використання коефіцієнта заповнення: $\gamma = \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_d}$.

ППН даної топології є однотактним, тобто за один період роботи в навантаження може надходити тільки один імпульс струму. Також процеси перетворення і передачі енергії в навантаження і розмагнічування сердечника трансформатора для наступного циклу відбуваються послідовно. При цьому паузи в процесі роботи

перетворювача є обов'язковими, незважаючи на те що це призводить до зниження вихідної потужності.

До переваг перетворювача даної топології можна віднести наступні:

- більш ефективний режим роботи;
- простота схемної реалізації, оскільки використовується тільки один ключ.

До недоліків даної схеми перетворення можна віднести однополярне намагнічування сердечника трансформатора, що приводить до неповного використання можливостей магнітного матеріалу. Якщо використовувати весь можливий діапазон перемагнічування осердя трансформатора від $-B_{\min}$ до B_{\max} замість $0 \dots B_{\max}$, який використовується в ППН прямої топології, то за певних умов можна скоротити частоту перемикання вдвічі, що може привести до скорочення динамічних втрат на ключових пристроях.

2.3. Розробка структурної схеми

Прототипом для електричної схеми є прямий перетворювач з розмагнічуючою обмоткою. Схема якого і часові діаграми наведена на рис. 2.1.

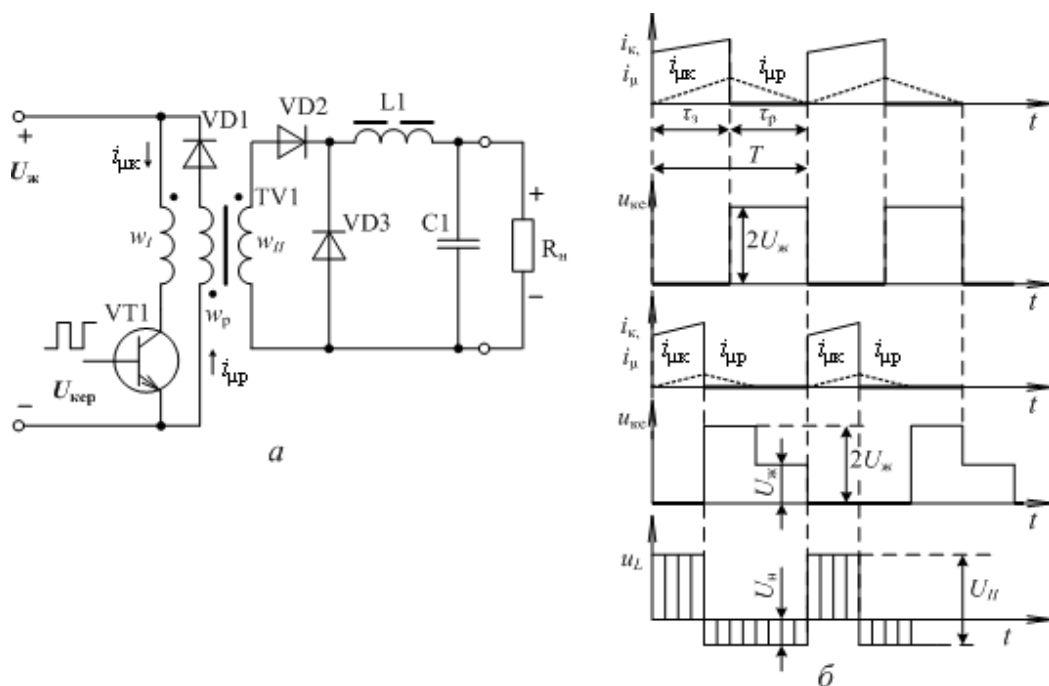


Рис. 2.1. Прямий перетворювач з обмоткою розмагнічування (ПРО):

а – схема електрична принципова, б – часові діаграми

Коли ключ замкнутий, до первинної обмотки трансформатора прикладено вхідну напругу. На вторинній обмотці формується напруга. Різниця напруги на вторинній обмотці і вихідного прикладено до дроселя L1. Сила струму в дроселі наростає, індуктор накопичує енергію. Струм тече в колі першої обмотки: "+" → W1 → VT1 → "-", "-" → Wp → VD1 → "+" і в колі другої обмотки: W2 → VD2 → L1 → C1 → W2, C1⁺ → VD3 → L1 → C1⁻.

Прикладання напруги до первинної обмотки трансформатора не тільки призводить до появи напруги на вторинній, але і починає намагнічувати сердечник. Тобто первинна обмотка поводить, як індуктор. Через неї починає йти зростаючий з часом струм намагнічування. Саме через цей струм, трансформатор не може передавати у вторинну обмотку постійну напругу. Крім того зв'язок первинної обмотки з вторинною неідеальний. Присутня індуктивність виток. У цій індуктивності теж накопичується енергія. Зі сказаного зрозуміло, що підключити первинну обмотку трансформатора до

джерела живлення, а потім просто відключити її не можна. Це призведе до стрибка напруги в момент відключення і пробією силового ключа.

Щоб забезпечити надійне розмагнічування сердечника трансформатора без сторонньої допомоги (без прикладання зовнішньої розмагнічуючої напруги), в осерді передбачається невеликий зазор (0.1 - 0.2 мм). Без цього зазору, сердечник намагнічується за своєю середньою магнітною лінією. Магнітне поле закріплюється і саме себе підтримує. Виходить такий закріплений постійний магніт. Якщо ж є зазор, то вся енергія як би накопичується саме в цьому проміжку, так як його магнітна провідність на кілька порядків нижче магнітної провідності матеріалу сердечника. Це виходить як гребля на бурхливій річці. У зазорі немає феромагнітного матеріалу. Там нема чому намагнічуватися. Так що там магнітне поле відразу ж спадає, як тільки зменшується струм через котушку.

Щоб енергія, накопичена в магнітному полі мала куди піти після розмикання силового ключа, передбачена розмагнічуюча обмотка W_p . Вона включена так, щоб струм через неї пішов в ланцюг живлення, повертаючи йому енергію. Тобто до плюса живлення виходить прикладена ще більш позитивна напруга.

В реальних умовах між первинною і розмагнічуючою обмотками також є індуктивність виток, що перешкоджає моментального перетікання струму з однієї обмотки в іншу. Стрибок напруги при розмиканні ключа все таки виникає, хоча і не такий великий, як якщо б розмагнічуючої обмотки не було. Прогнозувати величину цього сплеску важко, так як надійно розрахувати індуктивність виток зазвичай не вдається. Але із загальних міркувань можна стверджувати, що чим більше струм навантаження, тим більше буде стрибок напруги. По-перше, чим більше струм, тим сильніше стрибок при його переході в іншу обмотку. По-друге, чим більше струм, тим товстіший провід первинної обмотки, що збільшує індуктивність виток(зв'язку).

Електрична структурна схема представлена на рис.2.2.

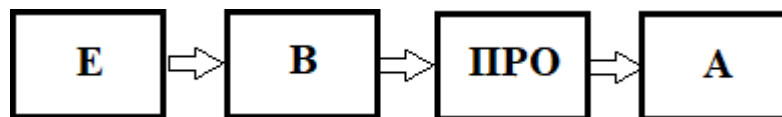


Рис. 2.2. Електрична структурна схема приладу

Схема складається з: 1) джерело живлення (Е); 2) випрямляч (В); 3) Прямоходовий перетворювач з обмоткою розмагнічування; 4) Акумуляторну батарею (А).

Напруга з джерела живлення надходить на випрямляч, після чого вже випрямлена поступає на первинну обмотку трансформатора, де амплітуда 220В перетворюється в 100В і виходить з вторинної обмотки трансформатора на акумуляторну батарею, після чого за зворотнім зв'язком за струмом сигнал попадає в систему керування, і регулює відкривання ключа для розмагнічування трансформатора.

3. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА

3.1. Опис принципової схеми

Електрична принципова схема зображена на рис. 3.1.

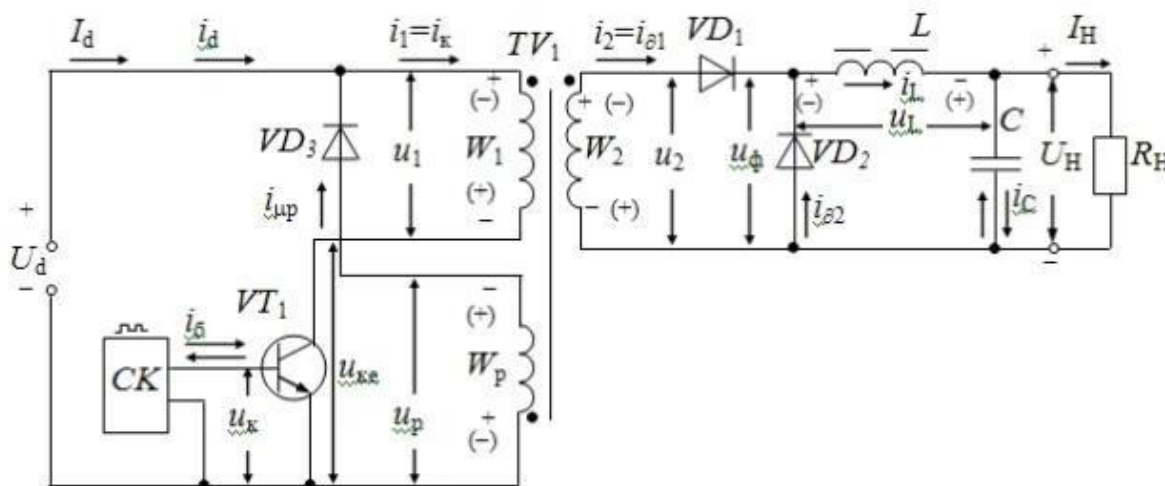


Рис. 3.1. Схема імпульсного блоку живлення

Схема працює наступним чином:

Первинна обмотка трансформатора W_1 підключається до джерела живлення U_d через ключ, який періодично відмикається і закривається. На вторинній обмотці W_2 з'являється змінна імпульсна напруга з частотою f , що визначається частотою керуючих імпульсів на виході системи керування. Ця напруга випрямляється діодом VD_1 , згладжується LC -фільтром і подається до навантаження.

Для розмагнічування осердя на інтервалі закритого стану транзистора в схему введені обмотка W_p і діод VD_3 , через які енергія, накопичена в колі намагнічування трансформатора, повертається у джерело живлення.

Електромагнітні процеси, що відбуваються у перетворювачі, дуже схожі за характером з процесами у широтно-імпульсному перетворювачі понижуючого типу з LC -фільтром.

Від останнього перетворювач з прямим ввімкненням діода відрізняється наявністю розділяючого трансформатора TV_1 та кола розмагнічування його осердя W_p, VD_3 .

Полярність підключення обмотки W_2 така, що під час включеного стану транзистора VT_1 випрямляючий діод VD_1 відкритий і напруга вторинної обмотки з амплітудою $U_{d2} = nU_{d1}$ прикладена до входу LC -фільтра.

Діод VD_3 закритий, обмотка розмагнічування відключена від джерела живлення U_d і не впливає на роботу перетворювача.

Колекторний струм транзистора на цьому інтервалі дорівнює сумі двох складових:

$$i_k = i_1 = \frac{W_2}{W_1} i_2 + i_{\mu 1} = n i_2 + i_{\mu 1}$$

де $n i_2$ – струм вторинної обмотки, приведений до первинної, який з часом зростає внаслідок зростання струму дроселя i_L ; $i_{\mu 1}$ – струм намагнічування первинної обмотки. Якщо знехтувати індуктивністю розсіювання та активним опором обмоток в схемі заміщення трансформатора, то наявність струму $i_{\mu 1}$ можна пояснити за допомогою еквівалентної схеми, зображеної на рис. 3.2.

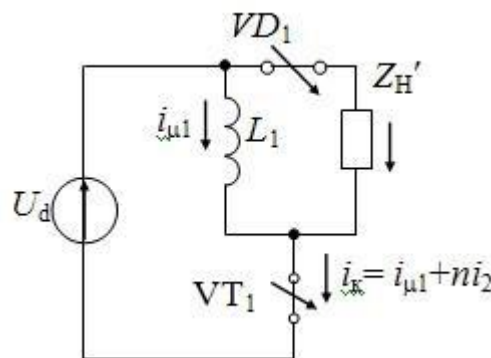


Рис.3.2. Еквівалентна схема заміщення ОПН

Еквівалентний опір навантаження Z_H' та індуктивність намагнічування трансформатора L_1 , приведені до первинної обмотки, які підключені до джерела живлення U_d через замкнуті ключі VD_1 та VT_1 . Внаслідок цього струм $i_{\mu 1}$ з часом зростає, а енергія накопичується в індуктивності L_1 . Коли транзистор в закритого стані, цю енергію потрібно повернути в джерело живлення чи в коло навантаження. Енергія повертається до джерела живлення за допомогою кола W_p , VD_3 як це показано в перетворювачі рис. 3.1.

У колі розмагнічування осердя відбуваються наступні процеси. В кінці інтервалу імпульс струму i_{m1} досягає свого максимального значення I_{m1} і запас енергії в індуктивності L_1 складатиме $L_1 \cdot I_{m1}^2 / 2$. Коли виключається транзистор то закривається випрямляючий діод VD_1 і складова струму i_{i2} , що зумовлена струмом навантаження, зменшується до нуля. За законом електромагнітної індукції, полярність напруг на всіх обмотках, в тому числі і на обмотці W_p , стане такою, яка показана на рис.3.1 в дужках.

Як тільки діод VD_3 відкриється, то в колі обмотки розмагнічування починає протікати струм i_{mp} , який замикається по контуру $W_p \rightarrow VD_3 \rightarrow U_d$. В наслідок дії проти-ЕРС-джерела U_d , струм i_{mp} буде зменшуватись за лінійним законом, починаючи зі свого максимального значення $I_{\mu p} = I_{\mu 1} \cdot W_1 / W_2$, яке він мав в момент комутації. При цьому енергія, що накопичена в індуктивності L_1 повертається до джерела живлення U_d .

Через те, що струм i_{mp} зменшується, відбувається зменшення магнітного потоку в осерді трансформатора, тобто йде процес розмагнічування осердя до початкового магнітного стану.

Як тільки процес рекуперації енергії закінчиться і струм в обмотці W_p зменшиться до нуля, тоді діод VD_3 закриється. Починаючи від цього моменту часу і до моменту наступного відкривання транзистора, напруги на всіх обмотках трансформатора та струми у них дорівнюють нулю.

3.2. Елементи і розрахунок їх параметрів

3.2.1. Розрахунок параметрів трансформатора

Враховуючи, що вихідна напруга і струм вторинної обмотки трансформатора має бути рівна $U_2 = 48V$ і $I_2 = 5A$, можна розрахувати потужність яка буде виділятися:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 48 \cdot 5 = 240(Bm).$$

ККД трансформатора близьке до 85%, звідси:

$$P_1 = P_2 / 0.85 = 240 / 0.85 = 282,3(Bm).$$

Потужність першої первинної обмотки:

$$P' = P_1 / 2 = 282,3 / 2 = 141,15(Bm)$$

Потужність другої первинної обмотки:

$$P'' = P_1 / 2 = 282,3 / 2 = 141,15(Bm)$$

Потужність обмотки залежить від площі поперечного перерізу сердечника в квадраті прямо пропорційно:

$$P_1 \propto S^2$$

$$\downarrow$$

$$S = \sqrt{P_1} = \sqrt{282,3} = 16,8(cm^2).$$

Далі визначаємо число витків на один вольт, при використанні трансформаторної сталі:

$$W' = \frac{50}{S} = \frac{50}{16,6} = 2,97 \approx 3 \left(\frac{\text{витка}}{\text{вольт}} \right).$$

Число витків у обмотках:

$$W_1' = W' \cdot U_1 = 3 \cdot 220 = 660(\text{витків}).$$

$$W_1'' = W' \cdot U_1 = 3 \cdot 220 = 660(\text{витків}).$$

$$W_2 = W' \cdot U_2 = 3 \cdot 24 = 72(\text{витка}).$$

Для того щоб уникнути втрати напруги на вторинній обмотці, береться на 10% більша кількість витків, ніж було розраховано.

$$W_2 = 72 + 8 = 80(\text{витків}).$$

Визначимо струм в первинній обмотці:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{282,3}{220} = 1,28(A).$$

В залежності від величини струму щільності струму вибирається діаметр проводу обмотки. Для щільності струму $2A/mm^2$ діаметр проводу можна обчислити за наступною формулою.

$$d = 0.8 \cdot \sqrt{I}.$$

Діаметр проводу первинних обмоток:

$$d_1' = d_1'' = 0.8 \cdot \sqrt{I_1} = 0.8 \cdot \sqrt{1.28} = 0.9(\text{мм}).$$

У випадку малої кількості витків товстого проводу, і низької напруги, щільність струму можна збільшити до $2,5 - 3 \text{ А / мм}^2$ тому, що дані обмотки краще охолоджуються. Враховуючи збільшення щільності струму коефіцієнт зменшується до 0,68.

Звідси діаметр вторинної обмотки дорівнює:

$$d_2 = 0.68 \cdot \sqrt{I_2} = 0.68 \cdot \sqrt{5} = 1.52(\text{мм}).$$

За отриманими результатами вибираємо тип дроту з таблиці в додатку а. Для первинних обмоток вибираємо дріт ПЕВ-1 з діаметром дроту з ізоляцією $d_1 = 0.96 \text{ мм}$, а для вторинної обмотки вибираємо ПЕВ-1 з діаметром дроту з ізоляцією $d_2 = 1.58 \text{ мм}$

Площу поперечного перерізу знаходимо наступним чином:

$$s \approx 0.8 \cdot d^2$$

Площа поперечного перерізу проводу первинних обмоток:

$$s_1' = s_1'' \approx 0.8 \cdot 0.96^2 = 0.737(\text{мм}^2).$$

Площа поперечного перерізу дроту вторинної обмотки:

$$s_2 \approx 0.68 \cdot 1.58^2 = 1.697(\text{мм}^2).$$

Загальна площа перетину витків трансформатора:

$$s_{\text{витків}} = s_1' \cdot W_1 + s_1'' \cdot W_1 + s_2 \cdot W_2 = 0.737 \cdot 660 + 0.737 \cdot 660 + 1.697 \cdot 264 = 1420.8(\text{мм}^2) = 14,208(\text{см}^2)$$

Врахуємо орієнтовну нещільність намотування, вплив каркаса ізоляційних прокладок між обмотками і їх шарами:

$$s_{\text{витків}} = 14,208 \cdot 2 = 28,416(\text{см}^2).$$

За даними результатами з таблиці в Додатку Б виберемо необхідний нам сердечник для трансформатора. Сердечник ШЛ 32х64.

3.2.2. Мікросхема UC3842

UC3842 є схема ШІМ-контролера зі зворотним зв'язком по струму і напрузі для управління ключовим каскадом на n-канальному МОП транзисторі, забезпечуючи розряд його вхідної ємності форсованим струмом величиною до 0.7А. Зображена на рис. 3.2.

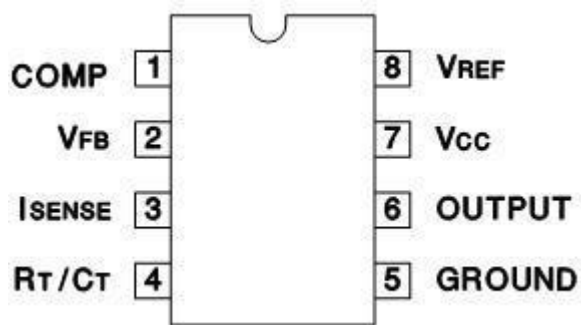


Рис. 3.2. Розміщення контактів мікросхеми UC3842

Структурна схема мікросхеми UC3842 зображена на рис. 3.3.

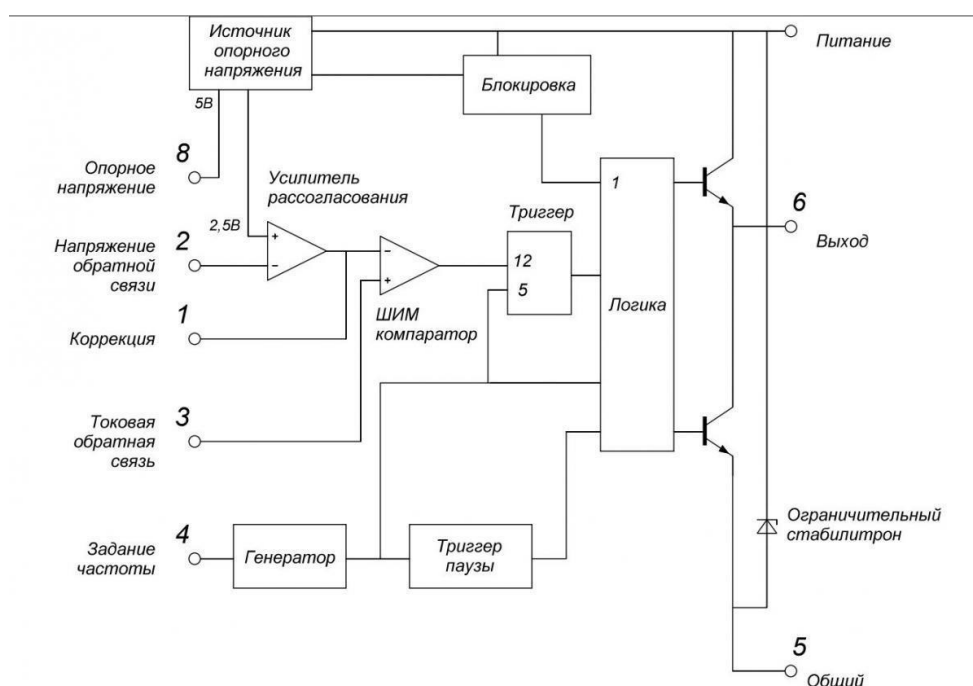


Рис. 3.3. Структурна схема мікросхеми UC3842

Призначення контактів мікросхеми UC3842:

1) Comp - вихід підсилювача помилок. Щоб ШІМ-контролера нормально працював необхідно компенсувати АЧХ підсилювача помилок, том до зазначеного входу підключається конденсатор ємністю 100пФ. Коли

напруга на цьому контакті стане менше 1В, то на виході 6 мікросхеми зменшуватиметься тривалість імпульсів, тим самим зменшуючи потужність даного ШІМ-контролера.

2) V_{fb} - вхід зворотного зв'язку. Напруга на цьому виході порівнюється із зразковою, яка формується всередині ШІМ-контролера UC3842. Результат порівняння модулює шпаруватість вихідних імпульсів, в результаті чого вихідна напруга блоку живлення стабілізується. Другий вихід служить для скорочення тривалості імпульсів на виході, якщо на нього подати напругу вище +2,5 вольт, то імпульси скоротяться і мікросхема знизить вихідну потужність.

3) C / S - сигнал обмеження струму. Контакт повинен бути приєднаний до резистору в ланцюзі витоку ключового транзистора. У момент перевантаження МОП транзистора напруга на опорі збільшується і при досягненні певного порогу UC3842A припиняє свою роботу, закриваючи вихідний транзистор.

4) R_t / C_t - підключення часо-задаючого RC-ланцюжка, який регулює частоту внутрішнього генератора. R підключається до V_{ref} - опорна напруга, а C до загального проводу. Частота змінюється в досить широких межах, верхньою межею є швидкодія ключового транзистора, а знизу - потужністю імпульсного трансформатора, яка падає зі зменшенням частоти. Практично частота вибирається в діапазоні 35 ... 85 кГц, але іноді джерело живлення цілком нормально працює і при значно більшій або значно меншій частоті.

5) Gnd - загальний вихід, «Земля».

6) Out - вихід ШІМ-контролера, підключається до затвору ключовому транзистору через резистор або паралельно з'єднані резистор і діод (анодом до затвору).

7) V_{cc} - вхід живлення ШІМ-контролера, на цей вихід мікросхеми подається напруга живлення в діапазоні від 16 вольт до 34, дана мікросхема має вбудований тригер Шмідта (UVLO), який включає мікросхему, якщо напруга живлення перевищує 16В, якщо-ж напруга з яких-небудь причин

стане нижче 10 вольт, відбудеться її відключення від напруги живлення. Мікросхема також має захист від перенапруги: якщо напруга живлення на ній перевищить 34В, мікросхема відключиться.

8) V_{ref} - вихід внутрішнього джерела опорної напруги, його вихідний струм до 50 мА, напруга 5 В. Підключається до одного з плечей дільника, служить для оперативного регулювання $U_{вихода}$ всього блоку живлення.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ

4.1. Принцип роботи та опис схеми

4.1.1. Опис моделі пристрою

Щоб на практиці дослідити імпульсний зарядний пристрій, було побудовано модель даного приладу, у середовищі MATLAB – Simulink, в якому виконувались необхідні обчислення, а також побудова графіків які описували фізичні процеси, що відбуваються в елементах схеми.

Побудована віртуальна модель схеми імпульсного зарядного пристрою зображена на рис. 4.1.

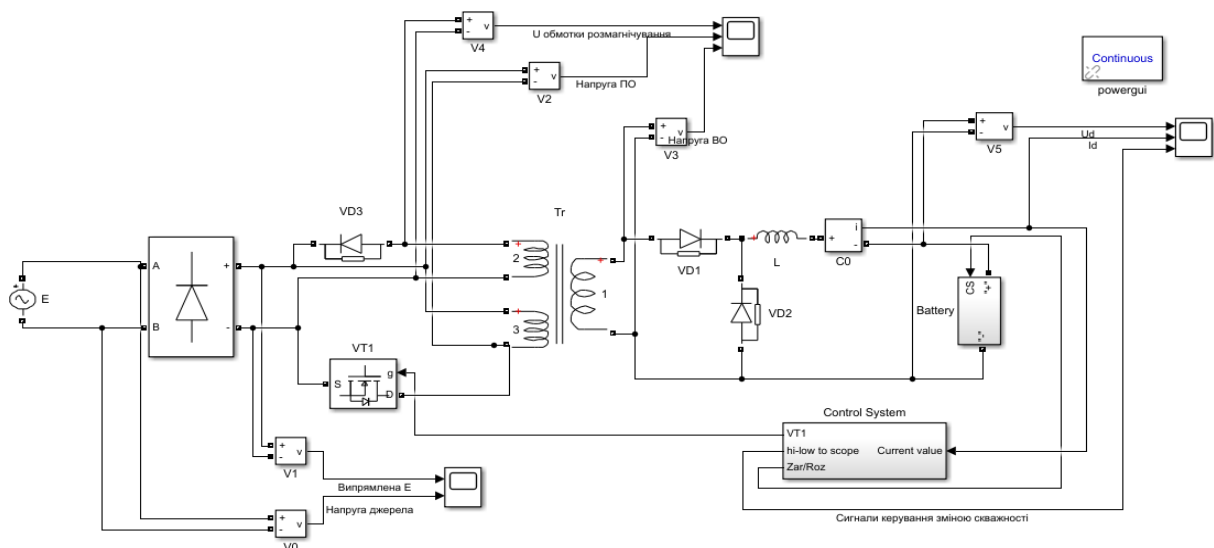


Рис. 4.1. Модель імпульсного зарядного пристрою

Модель працює наступним чином: з блоку джерела напруги E , на діодний міст надходить змінна напруга з амплітудою 220В, після випрямлення вона попадає на котушку первинну обмотку трансформатора Tr . Трансформатор намагнічується і у вторинній обмотці виникає напруга рівна 24В. Проходячи через відкритий діод $VD1$, напруга прикладається до акумуляторної батареї і починається процес заряджання, який контролюється системою керування, що відкриває чи закриває польовий транзистор. Коли

транзистор закритий, енергія намагніченого сердечника починає виходити в коли через обмотку розмагнічування, тим самим розмагнічуючи трансформатор, доки не відкриється транзистор.

В моделі були використані такі блоки:

- джерело змінної напруги (AC Voltage Source);
- діодний міст (Universal Bridge);
- діод (VD1, VD2, VD3 - diode);
- польовий транзистор (VT1);
- котушка індуктивності (L);
- трансформатор (Tr – Linear Transformer);
- конденсатор (C);
- блок вимірювання напруги (Voltage Measurement):

V0 – миттєве значення напруги джерела, V1 - миттєве значення напруги на діодному мості, V2 – миттєве значення напруги на первинній обмотці, V3 – миттєве значення напруги на вторинній обмотці, V4 - миттєве значення напруги на обмотці розмагнічування, V5 - миттєве значення напруги на батареї.

- блок вимірювання струму (Current Measurement):

C0 – миттєве значення струму, який протікає через батарею.

- підсистема, яка керує відкриванням і закриванням польового транзистора (Control System);
- блок осцилографа (Scope);
- підсистема, яка працює як модель батареї (Battery);

4.1.2. Підсистема системи керування

Система керування зображена на рис. 4.2.

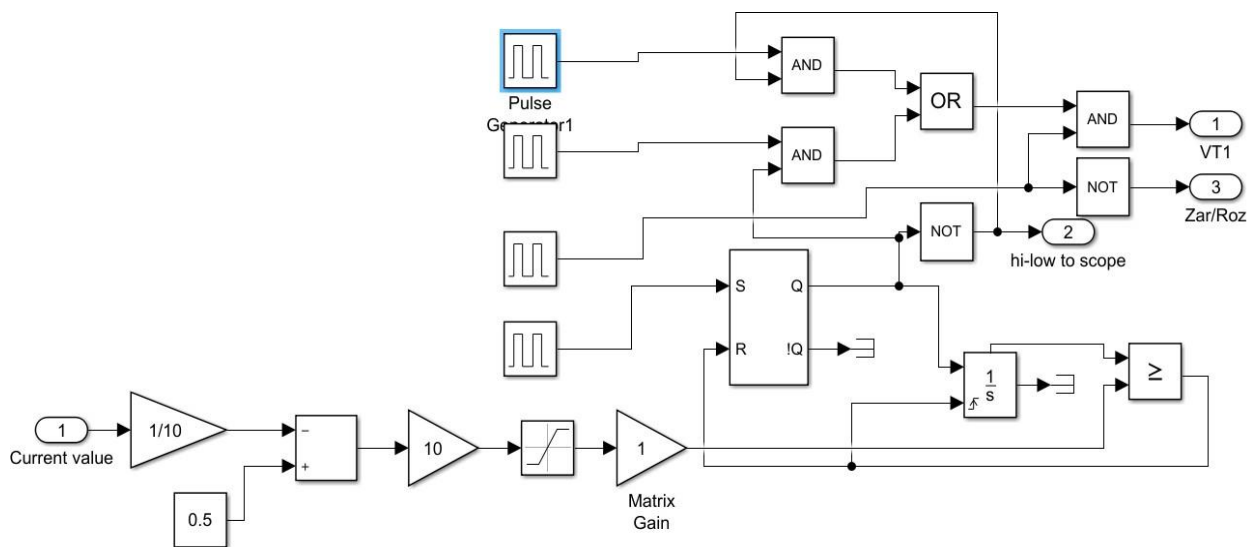


Рис. 4.2. Система керування – Control System

Містить наступні елементи:

- підсилювач (Gain);
- суматор (Sum);
- генератор постійного сигналу (Constant);
- генератор імпульсів (Pulse Generator);
- оператор відношення (Relational operator);
- блок який відіграє роль RS – триггера (S-R Flip-Flop);
- отримувач сигналу (Terminator);
- інтегратор (Integrator);
- оператор обмеження сигналу (Saturation);
- логічний елемент І (AND);
- логічний елемент НІ (NOT);

Система керування налаштована так, щоб відстежувати за зворотнім зв'язком за струмом заряджання, і в залежності від цього, система подає сигнал, який керує зміною скважності імпульсів, що подаються на керований ключ (польовий транзистор). Таке керування забезпечує величину струму заряду 5А. Як тільки струм стає більшим за 5А, система посиляє сигнал для зменшення скважності імпульсів керування транзистором, і струм падає до

рівня 5А, після чого знову подає сигнал для збільшення скажності і струм починає зростати, і процес відбувається знову.

4.1.3. Підсистема моделі акумулятора

З урахуванням основних параметрів, а також перехідних процесів які відбуваються в акумуляторі, під час заряджання було зроблено модель акумулятора, яка зображена на рис. 4.3.

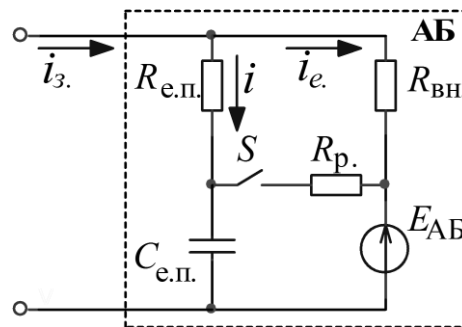


Рис. 4.3. Модель акумулятора з урахуванням перехідних процесів

Дана схема містить дві паралельно приєднані гілки, в першій є опір та ємність ($R_{e.п.}$, $C_{e.п.}$), які враховують електродні процеси при подачі напруги і струму на електроди акумулятора. До другої входять внутрішній опір і джерело напруги (E_{AB} , $R_{вн.}$). Може виникати ситуація, коли тривалість перехідного процесу подачі зарядного імпульсу більша ніж тривалість перехідного процесу під час вимкнення зарядного імпульсу, в такому випадку у схему додається опір розряду R_p , який вмикається за допомогою ключа S , паралельно до опорів $R_{вн.}$ та $R_{e.п.}$ після вимкнення зарядного імпульсу.

Дана схемна модель акумулятора потрібна для організації зворотного зв'язку акумулятора із системою керування зарядом, для точного і оптимального керування заряджанням акумулятора. Зворотній зв'язок дає змогу, в залежності від стану акумулятора змінювати довжини імпульсів зарядного струму. Потрібно знати сталу часу перехідного процесу для того, щоб задати параметри моделі. Аналітично визначити усталене значення складно, по тій причині, що схема заміщення акумулятора залежить від його типу, стану зарядженості, кількості циклів заряду розряду, правильності

використання та віку. Тому, щоб визначати момент завершення перехідного процесу, скористаємось виразом для знаходження відношень приростів:

$$\delta = \frac{u(k \cdot T) - u[(k-1) \cdot T]}{u(T) - u_{(0)}},$$

де T – період квантування, s ; $k \in \mathbb{Z}$; $u_{(0)}$ – напруга на акумуляторі на початку перехідного процесу.

При відношенні приростів $\delta \leq 0,05$ перехідний процес можна вважати таким, що закінчився.

Постійну часу визначимо за формулою:

$$\tau = -\frac{kT}{\ln \delta}.$$

Ідентифікацію параметрів схемної моделі акумулятора проводимо після визначення значення постійної часу.

Форма імпульсу зарядного струму (а), що подається на акумулятор, та форма імпульсу напруги (б), що виникає при цьому на акумуляторі зображена на рис. 4.4.

При розрахунку параметрів схемної моделі, зображеної на рис. 4.3, під час подачі імпульсу струму, вимірюється напруга на акумуляторі на початку та в кінці перехідного процесу ($U_{(0)}, U_{(\infty)}$), напруга холостого ходу акумулятора (або напруга на акумуляторі, що знаходиться у спокої $u_{cn} = E_{AB}$), зарядний струм (i_3) і стала часу перехідного процесу τ .

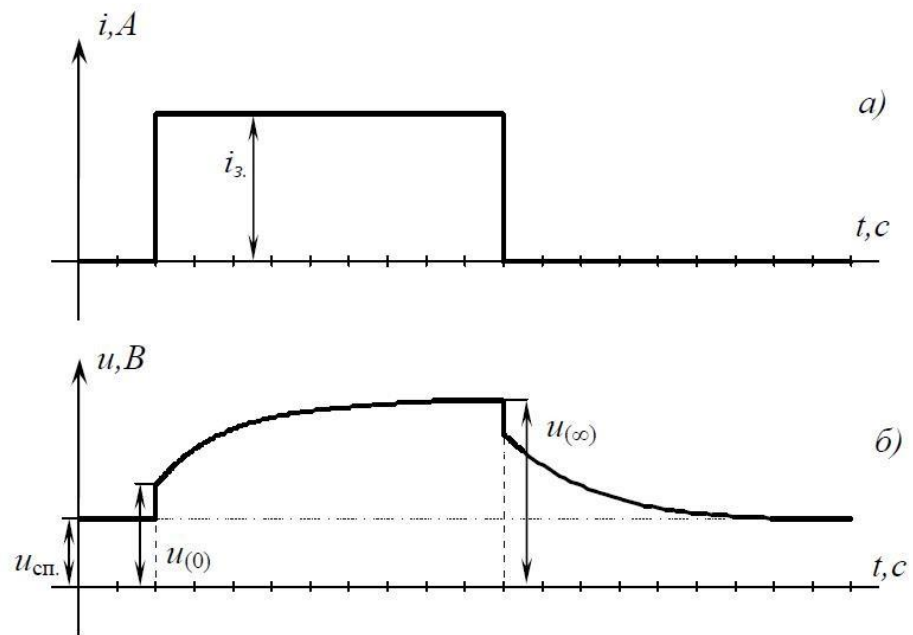


Рис. 4.4 Форма імпульсу зарядного струму: а - що подається на акумулятор, та форма імпульсу напруги; б - що виникає при цьому на акумуляторі

Першим обчислимо внутрішній опір ($R_{\text{вн.}}$):

$$R_{\text{вн.}} = \frac{u_{(\infty)} - E_{AB}}{i_3}$$

Далі визначимо еквівалентний струм $i_{e.(0)}$ у вітці з джерелом напруги і внутрішнім опором (E_{AB} , $R_{\text{вн.}}$):

$$i_{e.(0)} = \frac{u_{(0)} - E_{AB}}{R_{\text{вн.}}}$$

Обчислимо силу струму $i_{e.n.}$ у початковий момент подачі імпульсу струму у вітці з опором та ємністю ($R_{e.n.}$, $C_{e.n.}$), які враховують електродні процеси:

$$i_{(0)} = i_3 - i_{e.(0)}.$$

Опір електродних процесів $R_{e.n.}$ обчислимо за формулою:

$$R_{e.n.} = \frac{u_{(0)} - E_{AB}}{i_{(0)}}.$$

Визначаємо ємність:

$$C_{e.n.} = \frac{\tau}{R_{вн.} + R_{e.n.}}$$

У випадку коли, у модель вводиться додатковий опір розряду, який вмикається ключем S паралельно опорам $R_{e.n.}$ та $R_{вн.}$, після вимкнення зарядного імпульсу і розраховується за формулою:

$$R_{p.} = \frac{\frac{\tau_{p.}}{C_{e.n.}} \cdot (R_{e.n.} + R_{вн.})}{R_{e.n.} + R_{вн.} + \frac{\tau_{p.}}{C_{e.n.}}}$$

Параметри моделі дають можливість прогнозувати час завершення перехідного процесу, побудувати теоретичні графіки перехідних процесів на акумуляторній батареї і порівняти їх із значеннями, отриманими на практиці.

Підсистему акумуляторної батареї зображено на рис. 4.5.

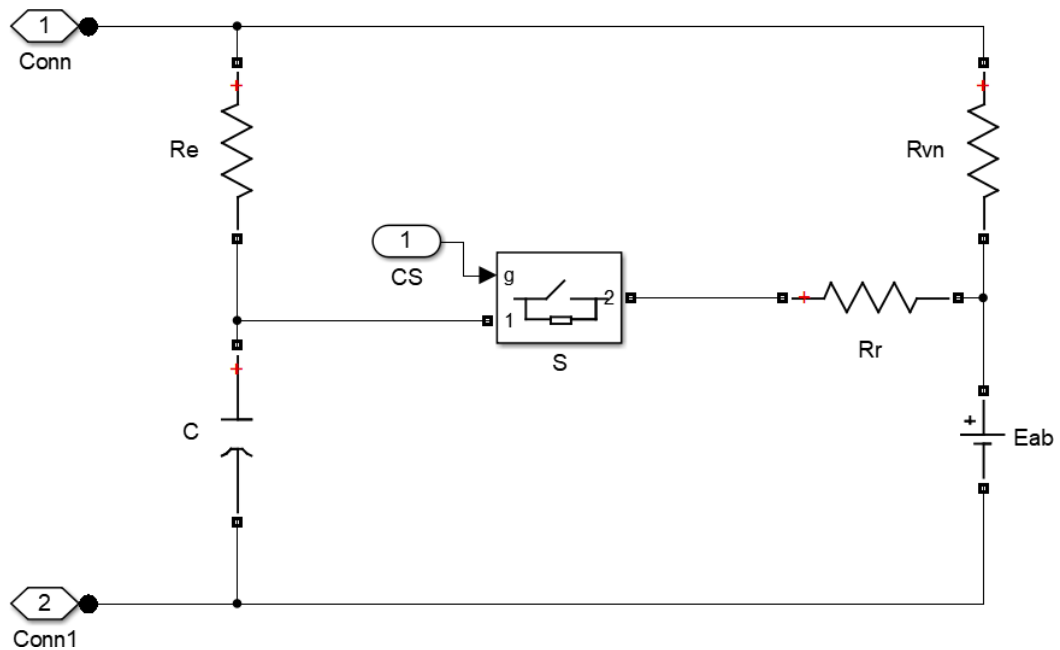


Рис. 4.5 Підсистема акумуляторної батареї

Вона містить:

- блок R_e – опір, що враховує електродні процеси;
- блок R_r – опір розряду;
- блок R_{vn} – внутрішній опір;
- блок E_{ab} – джерело напруги.

- блок C – ємність, що враховує електродні процеси;
- блок S – ідеальний ключ, який підключає додатковий опір розряду (R_r);

Параметри елементів підсистеми акумуляторної моделі:

Параметри елементів підсистеми акумуляторної моделі:

- напруга на акумуляторі у стані спокою: $E_{AB} = 12,45 \text{ В}$;
- внутрішній опір: $R_{vn} = 1,11 \text{ Ом}$;
- опір електродних процесів: $R_e = 0,041 \text{ Ом}$;
- ємність електродних процесів: $C = 898,7 \text{ мкФ}$;
- опір розряду: $R_r = 0,276 \text{ Ом}$

4.2. Параметри блоків силової частини

Вікно з параметрами джерела змінної напруги показано на рис. 4.6. Даний блок генерує синусоїдальну напругу з постійною амплітудою. Параметри блоку: амплітуда вихідної напруги джерела у вольтах (Peak amplitude); фаза у градусах (Phase); частота сигналу у герцах (Frequency); крок дискретизації (Sample time), даний параметр задає крок дискретизації за часом вихідної напруги джерела при створенні дискретних моделей; вимірювані змінні (Measurements), цей параметр дає змогу вибрати данні які будуть передаватися в блок Multimeter. Є наступні значення параметра:

- None - немає змінних для відображення;
- Voltage - вихідна напруга джерела.

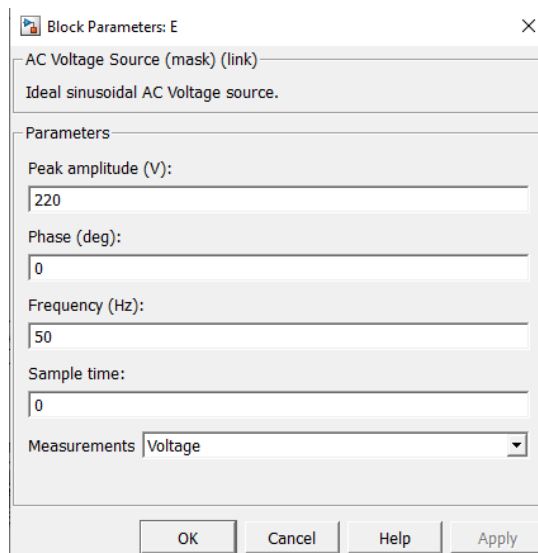


Рис. 4.6. Параметри джерела

Вікно налаштування параметрів блоку універсального моста зображено на рис. 4.7.

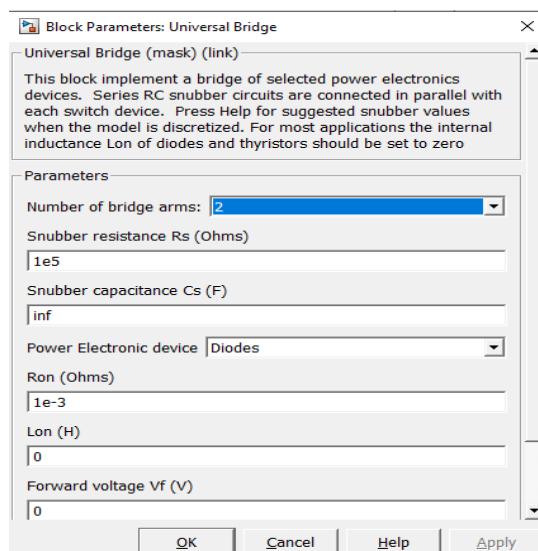


Рис. 4.7. Параметри діодного мосту

Даний блок моделює універсальний міст. Параметри: кількість плечей моста (Number of bridge arms), вибирається зі списку: 1, 2 або 3; опір демпфуючого ланцюга (Snubber resistance Rs), задається у омах; ємність демпфуючого ланцюга (Snubber capacitance Cs), задається у фарадах; тип напівпровідникових елементів моста (Power Electronic device), значення параметра вибирається зі списку: Diodes - діоди, MOSFET / Diodes - MOSFET-транзистори, шунтовані зворотними діодами, Thyristors - тиристори, , Ideal Switches - ідеальні ключі, GTO / Diodes - повністю керовані тиристори,

шунтовані зворотними діодами, IGBT / Diodes - IGBT-транзистори, шунтовані зворотними діодами; вимірювані змінні (Measurement), цей параметр дає змогу вибрати, що передається в блок Multimeter. Значення параметра вибираються зі списку: None - немає змінних для відображення, Device voltages - напруги на напівпровідникових елементах, Device currents - струми напівпровідникових елементів, UAB UBC UCA UDC voltages - напруги на затискачах моста. All voltages and currents - все напруги і струми моста. Відображуваним сигналам в блоці Multimeter присвоюються мітки: Usw1, Usw2, Usw3, Usw4, Usw5, Usw6 - напруги ключів, Isw1, Isw2, Isw3, Isw4, Isw5, Isw6 - струми ключів, Uab, Ubc, Uca, Udc - напруги на затискачах моста.

У випадку з діодним мостом, також задаються такі параметри: опір у ввімкненому стані (R_{on}), вимірюється в омах; індуктивність у ввімкненому стані (L_{on}), вимірюється в генрі; пряма напруга (Forward voltage V_f), задається у вольтах.

Вікно налаштування параметрів трансформатора на рис. 4.8.

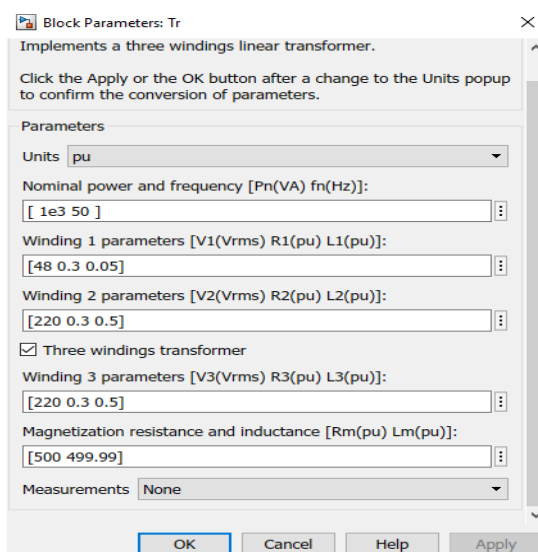


Рис. 4.8. Вікно налаштування параметрів трансформатора

У налаштуваннях можна змінювати параметри номінальної потужності і частоти трансформатора (Nominal Power and Frequency), параметри первинної та вторинної обмоток (Winding1 Parameters, Winding2 Parameters) і параметри гілки намагнічування (Magnetization resistance and inductance).

Параметри схеми заміщення трансформатора приведені до відносних (безрозмірних) величин.

Вікно налаштування польового транзистора зображено на рис. 4.9.

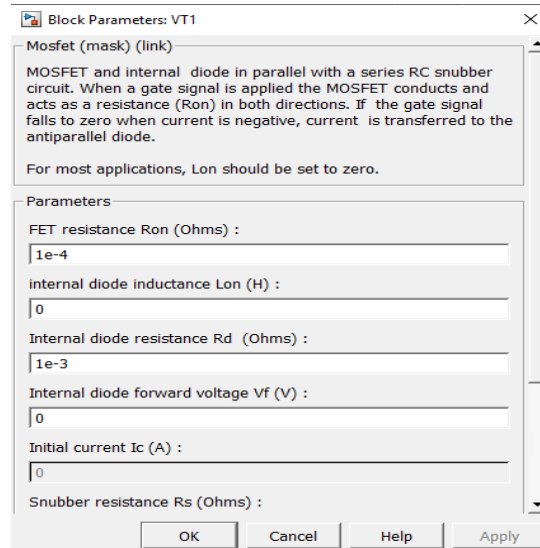


Рис. 4.9. Параметри MOSFET-транзистора

Даний блок моделює силовий польовий транзистор з паралельно включеним зворотним діодом.

Параметри блоку: опір у відкритому стані (FET resistance Ron), задається у омах; індуктивність внутрішнього діода у відкритому стані (Internal diode inductance Lon), задається в Генрі; опір внутрішнього діода у відкритому стані (Internal diode resistance Rd), задається у омах; напруга прямого зміщення внутрішнього діода (Internal diode forward voltage), задається у вольтах; початкове значення струму (Initial current Ic), при значенні параметра, яке дорівнює нулю моделювання починається при закритому стані приладу. Якщо параметр заданий позитивним значенням, то моделювання буде розпочато при відкритому стані приладу; опір демпфуючого ланцюга (Snubber resistance Rs), задається у омах; ємність демпфуючого ланцюга (Snubber capacitance Cs), задається у фарадах;

Вікно налаштування параметрів діодів зображені на рис. 4.10.

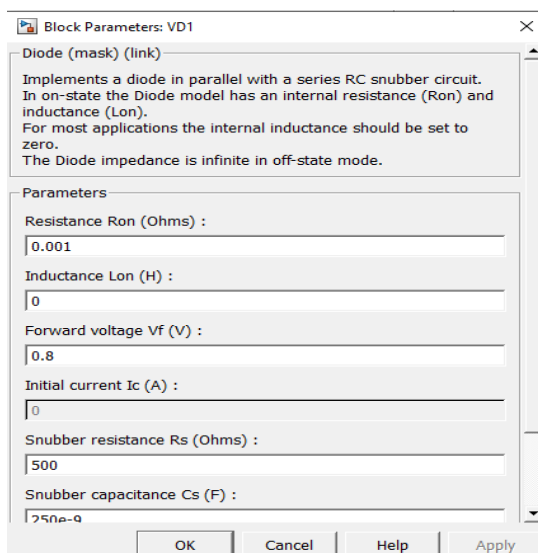


Рис. 4.10. Вікно налаштування параметрів діоду

Параметри блоку:

- опір у відкритому стані (Resistance Ron), в омах;
- індуктивність у відкритому стані (Inductance Lon), в генрі;
- напруга прямого зміщення (Forward voltage Vf), у вольтах;
- початкове значення струму (Initial current Ic), у амперах;
- опір демпфуючого ланцюга (Snubber resistance Rs), у омах;
- ємність демпфуючого ланцюга (Snubber capacitance Cs), у фарадах;

Вікно налаштування котушки індуктивності зображено на рис. 4.11.

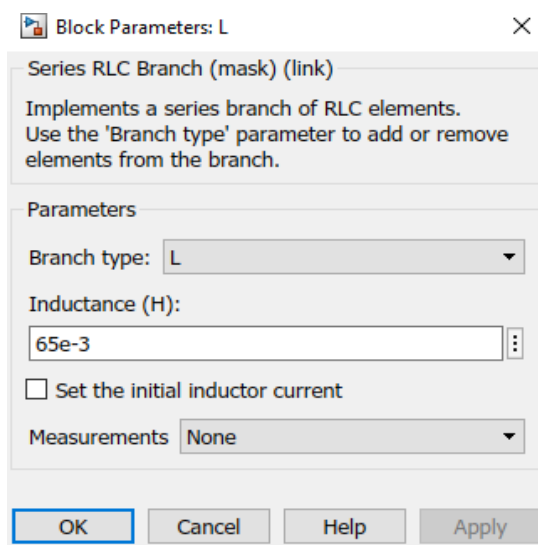


Рис. 4.11. Вікно налаштування параметрів котушки

Параметри блоку:

- індуктивність (Inductance, H), у генрі.

Вікно налаштування параметрів ємності показано на рис. 4.12.

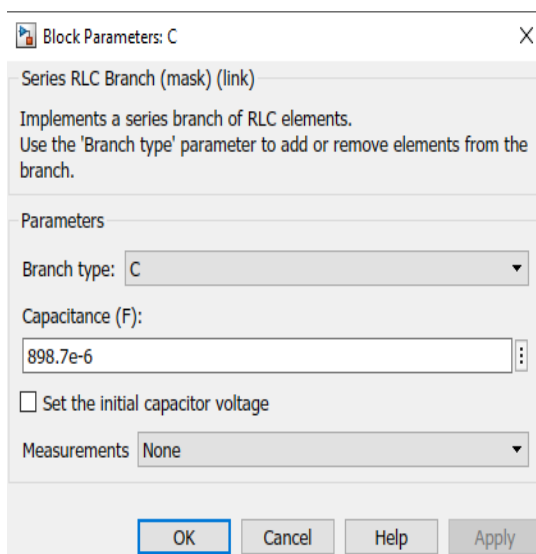


Рис. 4.12. Вікно налаштування параметрів конденсатора

Параметри блоку:

- ємність конденсатора (Capacitance, F), в фарадах

Вікно налаштування генератора імпульсів показана на рис. 4.13.

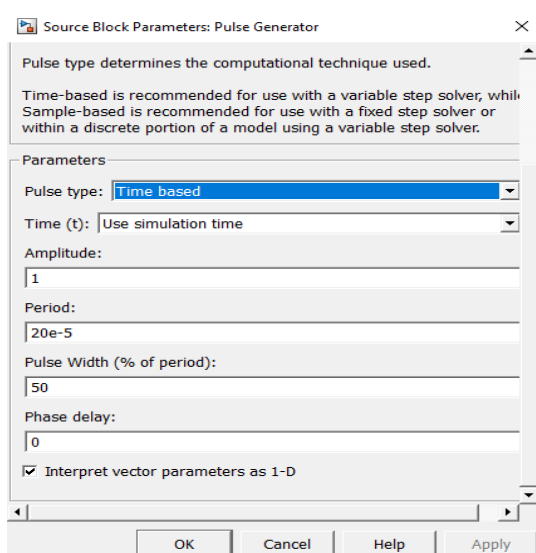


Рис. 4.13. Вікно налаштування параметрів генератора імпульсів

Параметри блоку:

- амплітуда сигналу (Amplitude);

- період сигналу (Period);
- шпарватість імпульсу (Pulse Width, % of period);
- фаза затримки (phase delay);

Вікно налаштування генератора імпульсів показана на рис. 4.14.

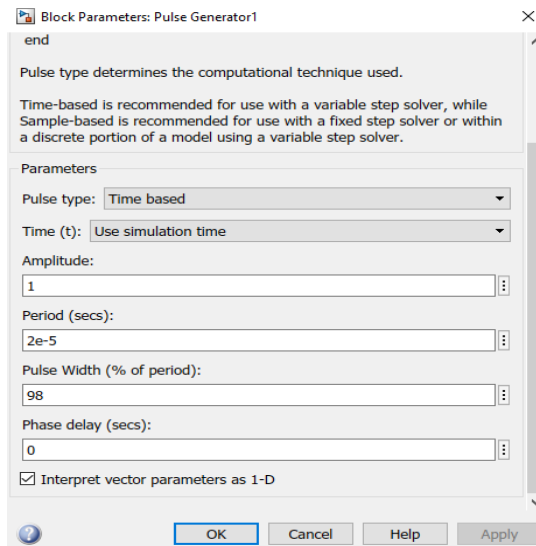


Рис. 4.14. Вікно налаштування параметрів генератора імпульсів

Вікно налаштування генератора імпульсів показана на рис. 4.15.

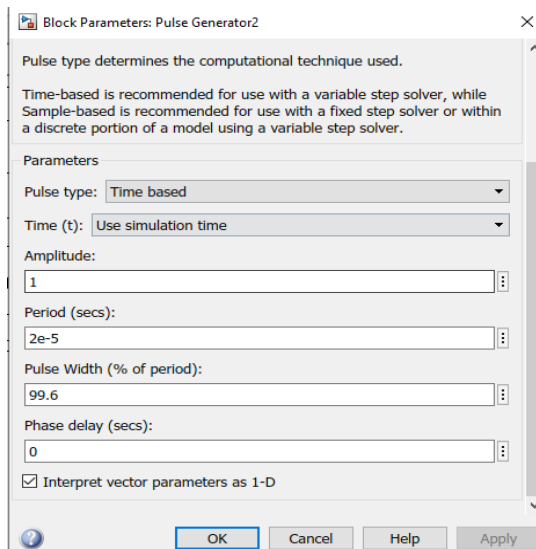


Рис. 4.15 Вікно налаштування параметрів генератора імпульсів

Вікно налаштування генератора імпульсів показана на рис. 4.16.

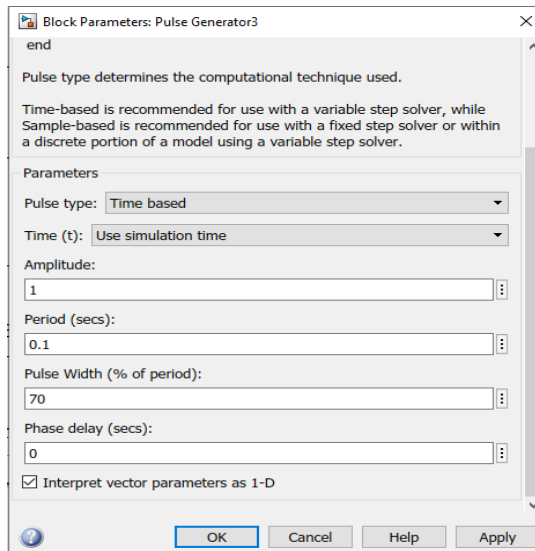


Рис. 4.16 Вікно налаштування параметрів генератора імпульсів

Також є можливість вибрати тип імпульсів за часом модуляції (Time Based), або за кроком дискретизації (Sample Based). Можливість вибрати таймер: за часом модуляції (Use simulation time), або зовнішній сигнал який буде задавати час (Use external signal). Вікно параметрів налаштування моделювання зображено на рис. 4.17.

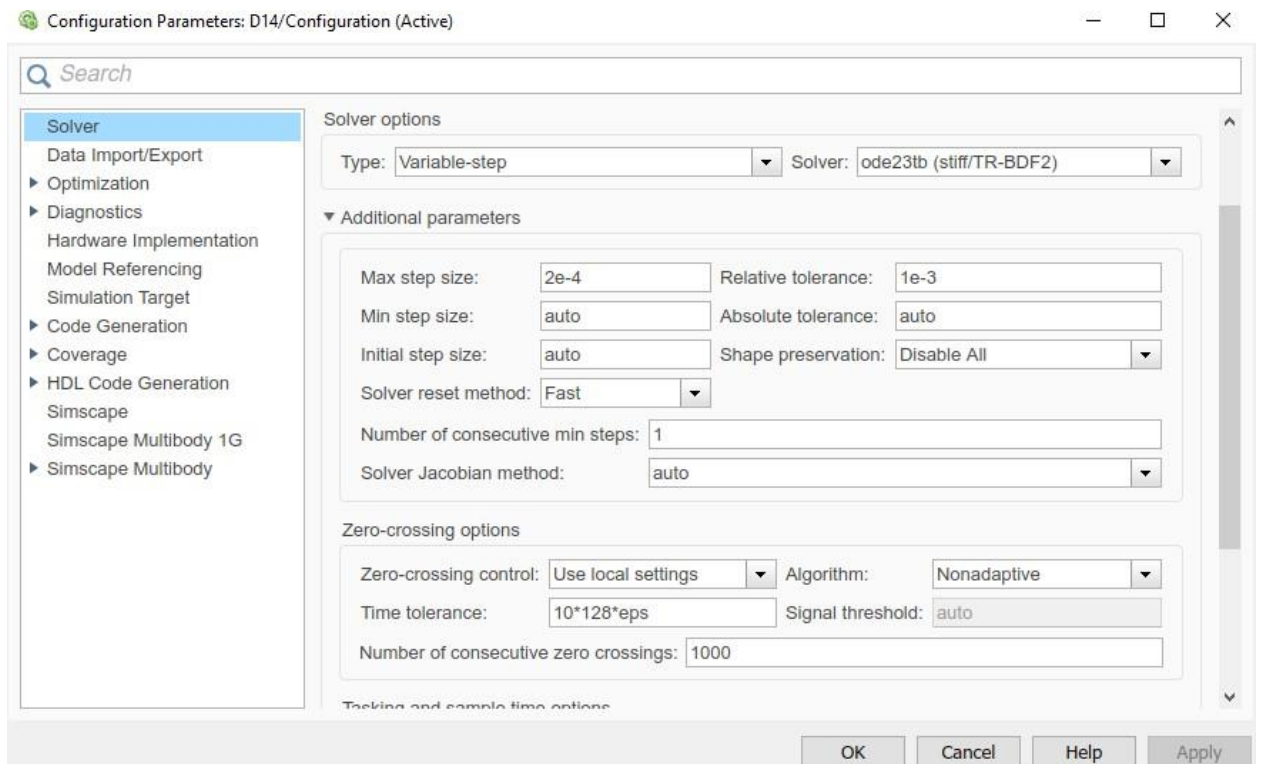


Рис. 4.17. Вікно налаштування параметрів моделювання

4.3. Результати моделювання

На рис. 4.18 зображені графіки випрямленої напруги і напруги джерела живлення з амплітудою 220В.

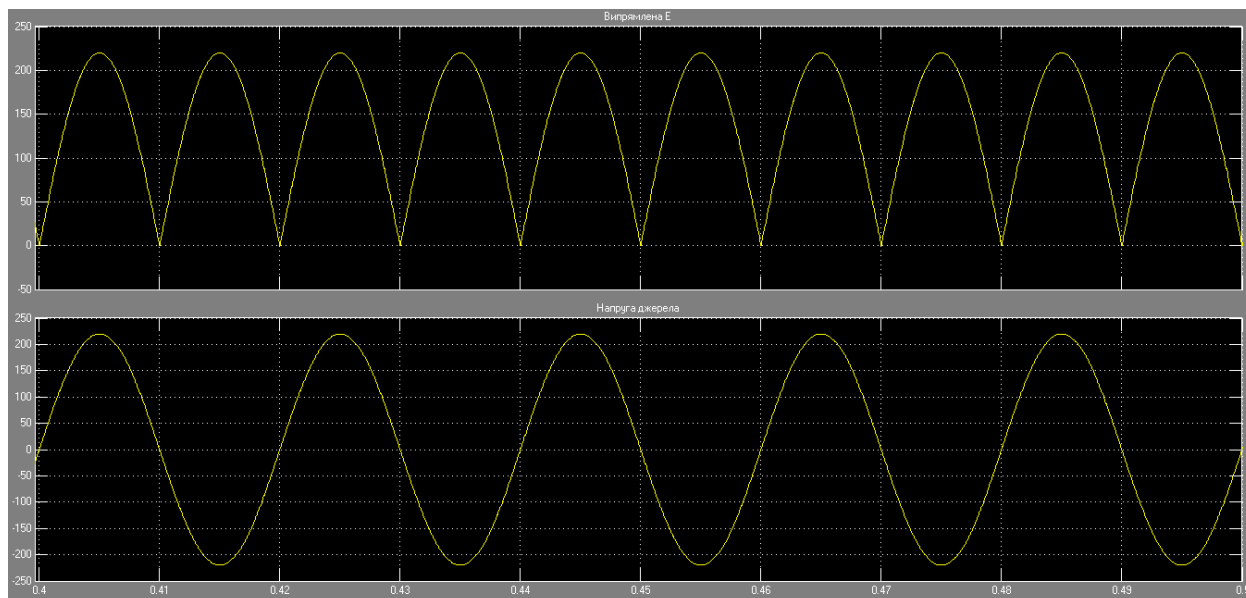


Рис 4.18. Графіки: 1- випрямлена напруга ,2 - напруга джерела живлення

На рис. 4.19. зображено графіки напруги на обмотках трансформатора, де чітко видно як намагнічується котушка, а також напругу розмагнічування. Саме за рахунок розмагнічування трансформатор не перегрівається і не руйнується. З графіків видно, що напруга розмагнічування у моменти коли напруга на обмотках падає до нуля, зменшує напругу обмоток ще більше, оскільки вони проти-напрявлені, це забезпечує стабільну роботу трансформатора.

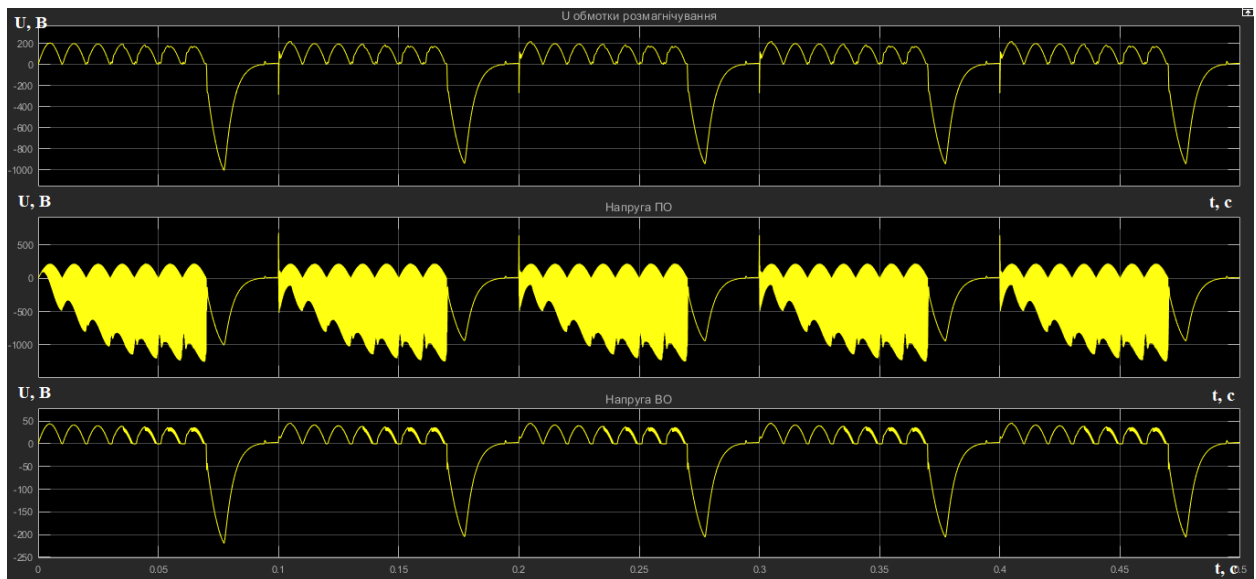


Рис. 4.19 Графіки напруги на обмотках: 1- напруга обмотки розмагнічування, 2 – напруга первинної обмотки, 3 –напруга вторинної обмотки

Вихідна напруга яка проходить через RC- фільтр випрямляється і стає близькою до постійної, в той же час імпульси керування вмикають і вимикають транзистор, внаслідок чого виходить імпульсний струм який можемо бачити на рис. 4.20.

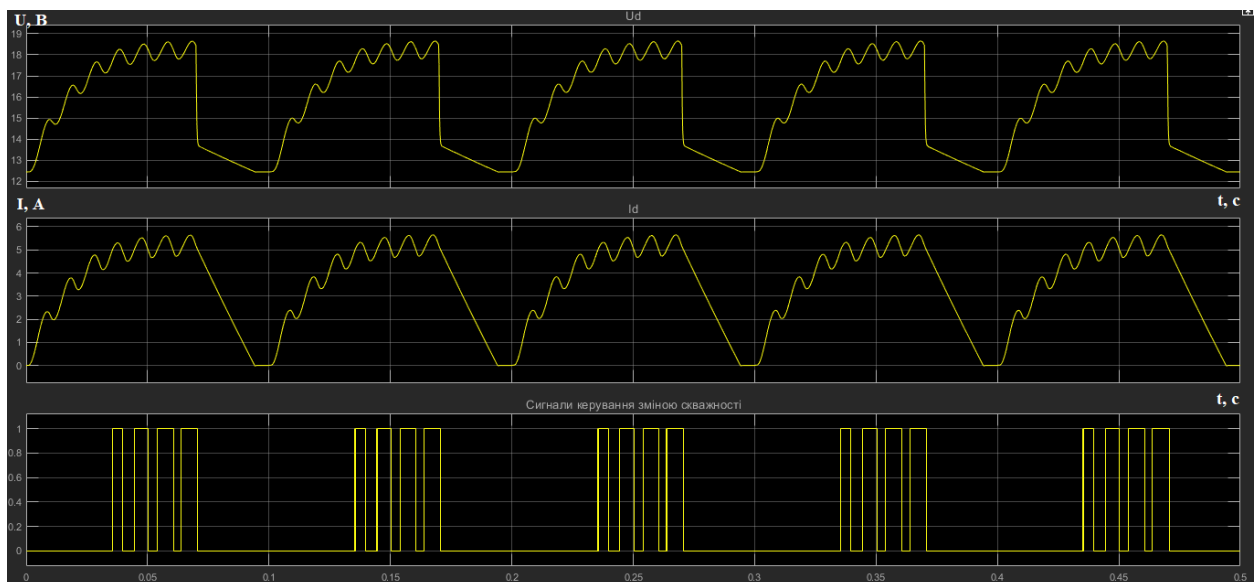


Рис. 4.20. 1 – Напруга прикладена до акумулятора, 2 – зарядний струм, 3 –імпульси керування

В наслідок цього на електродах акумулятора відбувається наближений до рівномірного розподіл заряду, це можна спостерігати коли відбувається невеличкий спад напруги під час сигналу системи керування. В моменти коли струм відсутній акумулятор віддає частину енергії в конденсатор. Також акумулятор не перегрівається, як це буває при заряджанні постійним струмом, і що призводить до виходу з ладу акумулятора.

ВИСНОВКИ

За рахунок малогабаритного трансформатора зібрано схему електричного приладу для заряджання акумуляторів імпульсним струмом. Даний прилад має досить високий ККД, близький до 85-90%, а також забезпечує стабільну роботу ключових елементів у схемі. Підтримує високий ККД за рахунок котушки розмагнічування, що також не дає трансформатору перегріватися і не псує його сердечник.

Показано, що прямо-ходовий перетворювач напруги являється актуальним у схемах, де потрібно високий ККД, надійність і невеликі габарити. Простота схеми забезпечує надійність, завдяки потужному польовому транзистору.

Метод заряджання акумуляторних батарей імпульсним струмом, зменшує нагрівання акумуляторної батареї в порівнянні з методом заряджання постійним струмом. За рахунок імпульсного струму досягається хороший рівень розподілу заряду на електродах.

Створена модель малогабаритного пристрою заряду імпульсним струмом з моделлю акумуляторної батареї являється працездатною і актуальною для використання.

За допомогою моделювання побудовані графіки напруги і струму на акумуляторній батареї, а також графіки напруги на первинній, вторинній і обмотці розмагнічування трансформатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Батарейки и аккумуляторы: Для широкого круга читателей / В. С. Лаврус (ред.). — К.: Наука и техника, 1995. — 47с.: ил. — (Информационное издание; Вып.1).
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учебник для электротехн., энерг., - 8-е изд., перераб. И доп. — М.: Высш. шк., 1984. — 559с.
3. Волківський В.Б. Триланковий пристрій для заряду енергоємних акумуляторних батарей асиметричним струмом // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”, частина 6. — 2004. — с. 89-94.
4. Волківський В.Б. Адаптивний метод заряду акумуляторних батарей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. — 2005. — Ч. 2.— С. 40-43.
5. Волківський В.Б. Схемна модель акумулятора при заряді імпульсним струмом та алгоритм керування адаптивним зарядом // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”, частина 2. — 2010. — с. 236-240.
6. Деордиев С. С. Аккумуляторы и уход за ними. — К.: Техніка, 1985. — 136 с.
7. Деордиев С. С. Аккумуляторы и уход за ними. — К.: Техніка, 1985. — 136 с.
8. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. — СПб.: ПИТЕР, 2002. — 528с.: ил.
9. И.В.Черных. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. — www.matlab.ru/simulink/book1/index.asp.htm
10. Источники энергии: Для широкого круга читателей / В. С. Лаврус (ред.). — К.: Наука и техника, 1997. — 106с.: ил. —
11. Кулбановский Я.С. Переходные процессы. М., «Энергия», 1974.

12. Накопители энергии: Учеб. Пособие для вузов / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич; Под ред. Д. А. Бута.—М.: Энергоатомиздат, 1991.—400 с.: ил.
13. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч. 2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко. За ред. В. С. Руденка. — Харків: Фоліо, 2000. — 360 с.
14. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз — К.: Вища шк.. 1987. — 280с.
15. Подражанский Юрий Маркович. Использование импульсных режимов заряда для повышения эксплуатационных параметров аккумуляторов: Дис... канд. техн. наук: 05.17.03 / Украинский гос. химико-технологический ун-т. — Д., 2000.
16. Преобразовательная техника: Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. — 2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Вища школа. 1983. — 431с.
17. Синдеев Игорь Михайлович. Электроснабжение летательных аппаратов: [Учебник для вузов гражд. авиации] / И. М. Синдеев. — М. : Транспорт, 1982. — 272 с. : ил.; 22 см.
18. Терещенко Т.О., Співак В.М., Волківський В.Б. Пристрій для заряду енергоємних акумуляторних батарей асиметричним струмом // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”, частина 2. — 2003. — с. 11-15.
19. Electronic components datasheet search URL — <http://www.alldatasheet.com/datasheet-df/pdf/161279/TI/NE555.html>
20. MATLAB 6 / 6.1 / 6.5 + Simulink 4 / 5. Основы применения. Полное руководство пользователя / Дьяконов В.П. — М.: СОЛОН-Пресс. — 2002.— 768 с.
21. «MATLAB&Toolboxes» URL — <http://matlab.exponenta.ru>
22. UC3842 описание, принцип работы, схема включения — <https://zipstore.ru/blog/uc3842-opisanie-printsip-raboty-skhema-vklyucheniya/>

ДОДАТОК А

Табл. А

Допустимий струм для намоточних дрітів

Номинальний діаметр (d) дроту (без ізоляції), мм	Перетин мідної жили (s), мм ²	Максимальний діаметр дроту з ізоляцією, мм		Допустимий струм, А при струмовому навантаженні		
		ПЕВ-1	ПЕВ-2 ПЕТВ	2 А/мм ²	2.5 А/мм ²	3 А/мм ²
0.08	0.005	0.10	0.10	0.01	0.0125	0.015
0.09	0.0064	0.11	0.12	0.013	0.016	0.019
0.1	0.0079	0.12	0.13	0.016	0.020	0.024
0.11	0.0095	0.13	0.14	0.019	0.024	0.028
0.12	0.0113	0.14	0.15	0.023	0.028	0.034
0.13	0.0133	0.15	0.16	0.027	0.033	0.040
0.14	0.0154	0.17	0.18	0.031	0.038	0.046
0.15	0.0177	0.18	0.19	0.035	0.044	0.053
0.16	0.0201	0.19	0.20	0.040	0.050	0.060
0.17	0.0227	0.20	0.21	0.045	0.057	0.068
0.18	0.0255	0.21	0.22	0.051	0.064	0.076
0.19	0.0283	0.22	0.23	0.057	0.071	0.085
0.20	0.0314	0.22	0.24	0.063	0.078	0.094
0.23	0.0416	0.23	0.28	0.083	0.104	0.125
0.25	0.0491	0.27	0.30	0.098	0.123	0.147
0.27	0.0573	0.28	0.33	0.115	0.143	0.172
0.29	0.0661	0.31	0.35	0.132	0.165	0.198
0.31	0.0755	0.33	0.37	0.151	0.189	0.226
0.33	0.0855	0.35	0.39	0.171	0.214	0.256
0.35	0.0962	0.37	0.41	0.192	0.240	0.289
0.38	0.1134	0.39	0.44	0.227	0.283	0.340
0.41	0.1320	0.42	0.47	0.264	0.330	0.396
0.44	0.1521	0.45	0.50	0.304	0.380	0.456
0.47	0.1735	0.48	0.53	0.347	0.434	0.520
0.51	0.2043	0.50	0.58	0.409	0.511	0.613
0.53	0.2206	0.56	0.60	0.441	0.551	0.662
0.57	0.2552	0.58	0.64	0.510	0.638	0.766
0.59	0.2734	0.64	0.66	0.547	0.683	0.820
0.62	0.3019	0.67	0.69	0.604	0.755	0.906
0.64	0.3217	0.70	0.72	0.643	0.804	0.965
0.67	0.3526	0.73	0.75	0.705	0.881	1.058
0.69	0.3739	0.74	0.77	0.748	0.935	1.122
0.72	0.4072	0.77	0.80	0.814	1.018	1.222
0.74	0.4301	0.80	0.83	0.860	1.075	1.290
0.77	0.4657	0.83	0.86	0.931	1.164	1.397
0.8	0.5027	0.86	0.89	1.005	1.257	1.508
0.85	0.5658	0.91	0.94	1.132	1.414	1.697
0.9	0.6362	0.96	0.99	1.272	1.590	1.909

Продовження табл. А

1.0	0.7854	1.07	1.09	1.571	1.963	2.356
1.25	1.227	1.32	1.35	2.453	3.067	3.681
1.3	1.327	1.38	1.41	2.654	3.317	3.981
1.4	1.539	1.48	1.51	3.078	3.847	4.617
1.5	1.767	1.58	1.61	3.534	4.417	5.301
1.56	1.911	1.64	1.67	3.822	4.777	5.733
1.62	2.061	1.70	1.73	4.122	5.152	6.183
1.68	2.217	1.76	1.79	4.434	5.542	6.651
1.74	2.378	1.81	1.85	4.756	5.945	7.134
1.81	2.573	1.86	1.93	5.146	6.432	7.719
1.9	2.827	1.99	2.02	5.654	7.067	8.481
2.0	3.132	2.09	2.12	6.264	7.83	9.396
2.24	3.929	2.34	2.37	7.858	9.82	11.787
2.44	4.676	2.54	2.57	9.352	11.69	14.028
2.63	4.895	2.60	2.63	9.79	12.237	14.685

ДОДАТОК Б

Таблиця Б

Типові розміри осердя

Тип магнітопр оводу	Габаритні типорозміри, мм			Корисна площа перетину магнітопр оводу, см ²	Розмір вікна, мм			Габаритна потужність, ВА	Густина струму А/мм ²
ШЛ16х20	64	56	20	2.9	16	40	6.4	15-20	1.7-2.2
ШЛ 16х25	64	56	25	3.6	16	40	6.4	18-25	2.0-2.5
ШЛ 16х32	64	56	32	4.0	16	40	6.4	25-30	2.4-3.6
ШЛ 20х20	80	70	20	3.6	20	50	10	35-45	2.15-2.7
ШЛ 20х25	80	70	25	4.5	20	50	10	45-55	2.15-2.7
ШЛ 20х32	80	70	32	5.7	20	50	10	60-75	2.15-2.7
ШЛ 20х42	80	70	40	7.2	20	50	10	70-80	2.1-2.6
ШЛ 25х25	100	87.5	25	5.6	25	62.5	15.6	100-125	2.0-2.5
ШЛ 25х32	100	87.5	32	7.2	25	62.5	15.6	120-150	1.9-2.4
ШЛ 25х40	100	87.5	40	9.0	25	62.5	15.6	150-190	1.8-2.3
ШЛ 25х50	100	87.5	50	11.2	25	62.5	15.6	180-230	1.7-2.2
ШЛ 32х32	128	112	32	9.2	32	80	25.6	250-310	1.8-2.3
ШЛ 32х40	128	112	40	11.5	32	80	25.6	250-310	1.75-2.2
ШЛ 32х50	128	112	50	14.4	32	80	25.6	690-440	1.7-2.1
ШЛ 32х64	128	112	65	18.4	32	80	25.6	450-580	1.6-2.0
ШЛ 40х40	160	140	40	14.4	40	100	40	550-690	1.6-2.0
ШЛ 40х50	160	140	50	18.0	40	100	40	670-850	1.3-1.9
ШЛ 40х64	160	140	64	23.0	40	100	40	800-1000	1.4-1.9
ШЛ 40х80	160	140	80	28.8	40	100	40	950-1200	1.4-1.9